

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Realizace a modelování prototypu

„popkornového“ fluidního zařízení

**Realization and Modeling of the Popcorn FB Boiler
Prototype**

Student: Bc. Ondřej PROKŠA

Vedoucí práce: prof. RNDr. Milada KOZUBKOVÁ, CSc.

Ostrava 2013

-ZADÁNÍ-

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 17. 5. 2013

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 17. 5. 2013

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ondřej PROKŠA

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Slezská 63, Jilešovice, 747 92

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PROKŠA, O. *Realizace a modelování prototypu „popkornového“ fluidního zařízení: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2013, 63 s. Vedoucí práce: KOZUBKOVÁ, M.

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem potřebných údajů a následným sestavením „popkornového“ fluidního zařízení. Fluidace je popsána jako fyzikální jev a je rozebráno její uplatnění v energetice. V práci je proveden výpočet v softwaru Ansys - Fluent a následně je popsán pokus na ověření teoretických výpočtů modelu „popkornového“ fluidního zařízení.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

PROKŠA, O. *Realization and Modeling of the Popcorn FB Boiler Prototype: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Energetics, 2013, 63 p. Thesis head: KOZUBKOVÁ, M.

This diploma thesis is focused on calculation of necessary data for followed construction of the popcorn fluidized bed reactor. Fluidization is described as a physical phenomenon and there is a discussion about its application in energetics. The thesis also includes calculation in Ansys - Fluent software and subsequently there is description of an attempt to verify the theoretical calculations of the popcorn fluidized bed reactor.

KLÍČOVÁ SLOVA

- fluidní kotel
- cyklón
- popkorn

KEYWORDS

- fluidized bed boiler
- cyclone
- popcorn

1.	Úvod	1
2.	Teorie fluidního jevu	3
2.1	FLUIDACE	3
2.2	FLUIDNÍ VRSTVA.....	3
2.2.1	Základní typy fluidních vrstev	4
2.3	ZÁKLADNÍ POJMY	6
2.3.1	Tlaková ztráta fluidní vrstvy	7
2.3.2	Prahová rychlost fluidace.....	7
2.3.3	Prahová rychlost úletu	8
2.3.4	Mezerovitost fluidní vrstvy	9
2.3.5	Charakterizace tvaru a velikosti částice (Geldartovo rozdělení částic)	10
2.4	HISTORICKÝ VÝVOJ FLUIDNÍ TECHNIKY	11
2.5	KONCEPCE FLUIDNÍCH KOTLŮ	12
2.5.1	Fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou	12
2.5.2	Fluidní kotle s expandující fluidní vrstvou	14
2.5.3	Fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou	15
2.6	PALIVA SPALOVÁNA VE FLUIDNÍCH OHNIŠTÍCH	16
2.6.1	Složení paliva.....	16
2.6.2	Spalování pevných paliv	16
2.6.3	Spalování kapalných paliv	16
2.7	VLIV FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	17
2.7.1	Problematika emisí	17
2.8	SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ.....	18
2.8.1	Výhody fluidního spalování.....	18
2.8.2	Nevýhody fluidního spalování	19
3.	Základní výpočty fluidace a proudění	20
3.1	VÝPOČET TLAKOVÉ ZTRÁTY.....	20
3.2	VÝPOČET MINIMÁLNÍHO PRAHU FLUIDACE	20
3.3	VÝPOČET PRAHU ÚLETU	22
3.4	SUMARIZACE ANALYTICKÉHO VÝPOČTU	24

4.	Výpočet proudění užitím softwaru Ansys - Fluent	25
4.1	TEORIE MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V SOFTWARE ANSYS - FLUENT.....	25
4.2	TEORETICKÝ MODEL „POPKORNOVÉHO“ FLUIDNÍHO ZAŘÍZENÍ	26
4.3	TEORIE MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ PŘES PORÉZNÍ VRSTVU	27
5.	Realizace „popkornového“ fluidního zařízení.....	32
5.1	VÝBĚR KOMPONENT	32
5.1.1	Konstrukce rámu.....	32
5.1.2	Doprava vzdušiny.....	33
5.1.3	Ohřev vzdušiny.....	34
5.1.4	Potrubní část	35
5.1.5	Rošt	37
5.1.6	Cyklón.....	38
5.2	SESTROJENÍ „POPKORNOVÉHO“ FLUIDNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	39
6.	Praktické ověření teoretických výpočtů	40
6.1	POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	40
6.2	POSTUP MĚŘENÍ	41
6.2.1	Postup výpočtu	41
7.	Ekonomické vyhodnocení projektu	44
8.	Závěr	45
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	50
	SEZNAM TABULEK.....	52
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	53
	SEZNAM PŘÍLOH	56

1. Úvod

Počátkem 21. století žije na zemi 7 miliard lidí. S populační expanzí lidstva se zvyšují nároky na energii. Jedním z hlavních rozdílů mezi rozvinutými a rozvojovými zeměmi je právě spolehlivá dodávka energie. V současnosti získáváme elektrickou energii převážně z fosilních paliv, z jádra a z vody. Zásoby ropy, zemního plynu a uhlí nejsou neomezené a jejich spalování naráží na ekologický odpor společnosti. Otázkou budoucnosti je, jak zaručit dostatek stabilní a ekologické energie pro všechny. Jednou z reálných možností prodloužení životnosti fosilních paliv je jejich zpracování s vyšší účinností. Technologie v podobě fluidního spalování nabízí ekonomické, ekologické a energetické výhody. Hlavní výhodou oproti klasickému spalování je vyšší účinnost odsíření spalin, redukce NO_x a palivová flexibilita.

Cílem této diplomové práce je návrh a realizace „popkornového“ fluidního zařízení. Tento stroj poslouží při simulacích fluidního chování a principu při výrobě popkornu.

Teoretická část bude věnována rozboru fluidace, vzniku jednotlivých fluidních vrstev a jejich uplatnění v technické praxi. Ve stručnosti popíši základní pojmy a rovnice vyjadřující fluidní chování částic. Pokusím se uvést základní konstrukční typy fluidních kotlů. Dále rozeberu jednotlivé druhy paliv, které spalujeme ve fluidní vrstvě, a případně jejich vlivu na tvorbu emisí a na životní prostředí. V závěru kapitoly se pokusím sumarizovat výhody a nevýhody fluidního spalování.

Pomocí základních vztahů udělám analytický výpočet tlakové ztráty fluidní vrstvy a dále prahových rychlostí fluidace a úletu, abych mohl vybrat dmýchadlo s vhodnými parametry pro přemístění popkornu do cyklónové části.

V další kapitole se zaměřím na simulaci proudění vzduchu na zjednodušeném modelu v softwaru Ansys - Fluent. Pomocí okrajových podmínek a parametrů fluidace zjistím vliv velikosti zrn na proudění.

V kapitole realizace projektu se budu zabývat výběrem vhodných komponent a jejich základním popisem. Dále popíši postup sestavení „popkornového“ fluidního zařízení.

Po úspěšném sestavení a zprovoznění „popkornového“ fluidního zařízení se pokusím pomocí experimentů a měření ověřit pravdivost teoretických výpočtů. Hlavním zkoumaným parametrem bude tlaková ztráta fluidní vrstvy.

V ekonomické části se pokusím vyhodnotit finanční stránku projektu. Rozeberu veškeré náklady na pořízení jednotlivých komponent a zjistím možné alternativy pro budoucí vylepšení.

V závěrečné části vyhodnotím výstupy z diplomové práce a možnosti jejich uplatnění pro další bádání.

2. Teorie fluidního jevu

Hlavní cíl teoretické části diplomové práce je stručný popis fluidace, fluidní vrstvy a jejich technické uplatnění v praxi. Je shrnut historický vývoj fluidních ohnišť a jejich konstrukční koncepce a také paliva spalována ve fluidních ohništích. Dále je popsán vliv spalování na životní prostředí. V závěru jsou shrnuty výhody a nevýhody fluidního spalování.

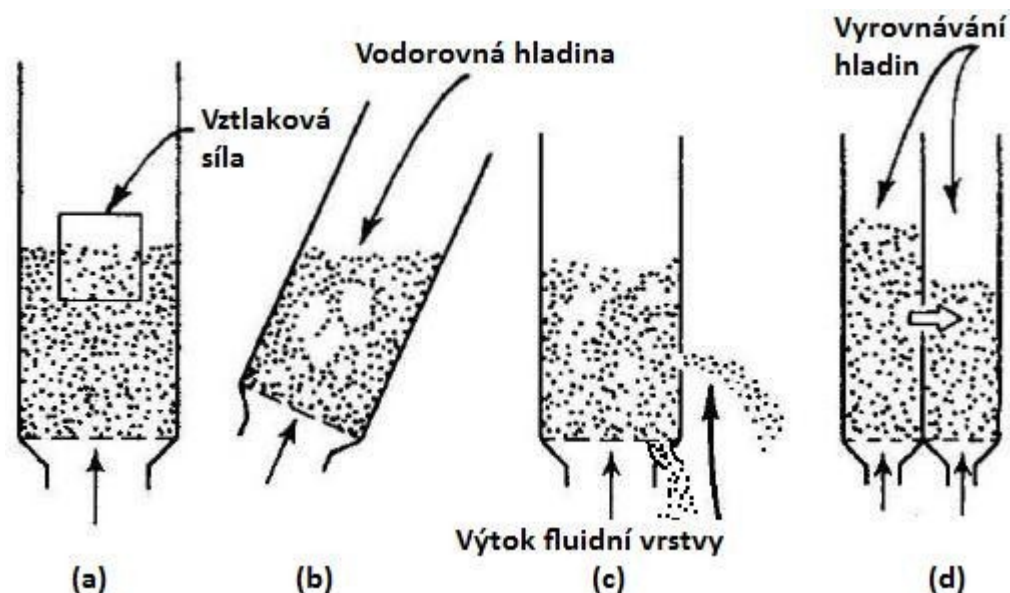
2.1 Fluidace

Fluidace je děj, při kterém proudící tekutina (plyn) spolu s pevnými částicemi vytvoří suspenzi, přičemž směr proudění je v opačném směru zemské tíže. Celý povrch pevných částic je ve styku s proudící tekutinou, a proto dochází k lepšímu promíchání suspenze a dochází k intenzivnějšímu sdílení tepla a hmoty. Fluidace probíhá v nádobě (fluidizační komora), do které je přes děrovanou přepážku (rošt) přiváděno fluidizační médium. Fluidní techniky nacházejí uplatnění v průmyslu při třídění zrnitého materiálu, sušení, chlazení, směšování, spalování práškových hmot nebo v chemických reaktorech při katalytických reakcích. V energetice se pak převážně setkáváme s fluidní technikou při spalování méně kvalitních uhlí. [1]

2.2 Fluidní vrstva

Fluidní vrstva vzniká ve fluidizační komoře, ve které jsou na děrované přepážce umístěny pevné částice zrnitého materiálu. Přes tuto přepážku protéká fluidizační médium a spolu s pevnými částicemi vytváří suspenzi (fluidní vrstvu). Základní charakteristikou fluidní vrstvy je její pohyblivost, díky které se chová jako reálná kapalina. Povrch pevných částic je v kontaktu s proudícím médiem, a tím dochází k intenzivnímu přestupu tepla a hmoty. Tvar hladiny fluidní vrstvy se blíží reálné kapalině. Tedy fluidní vrstva má analogické vlastnosti jako reálná kapalina (obr. 1). Na tělesa ponořená do fluidní vrstvy působí vztlaková síla F_{Ar} (obr. 1 (a)). Podle vlastní hustoty pak ponořená tělesa ve fluidní vrstvě plavou, vznášejí se nebo klesají ke dnu

(k roštu). Hladina fluidní vrstvy je vždy kolmá k tíhové síle, tudíž je vodorovná (obr. 1 (b)). Díky hydrostatickému tlaku působícímu na stěny nádoby, lze fluidní vrstvu vypouštět otvorem ve dně nebo na stěně (obr. 1 (c)). Při vzájemném propojení více fluidních vrstev dochází k vyrovnávání hladin (obr. 1 (d)). [1]



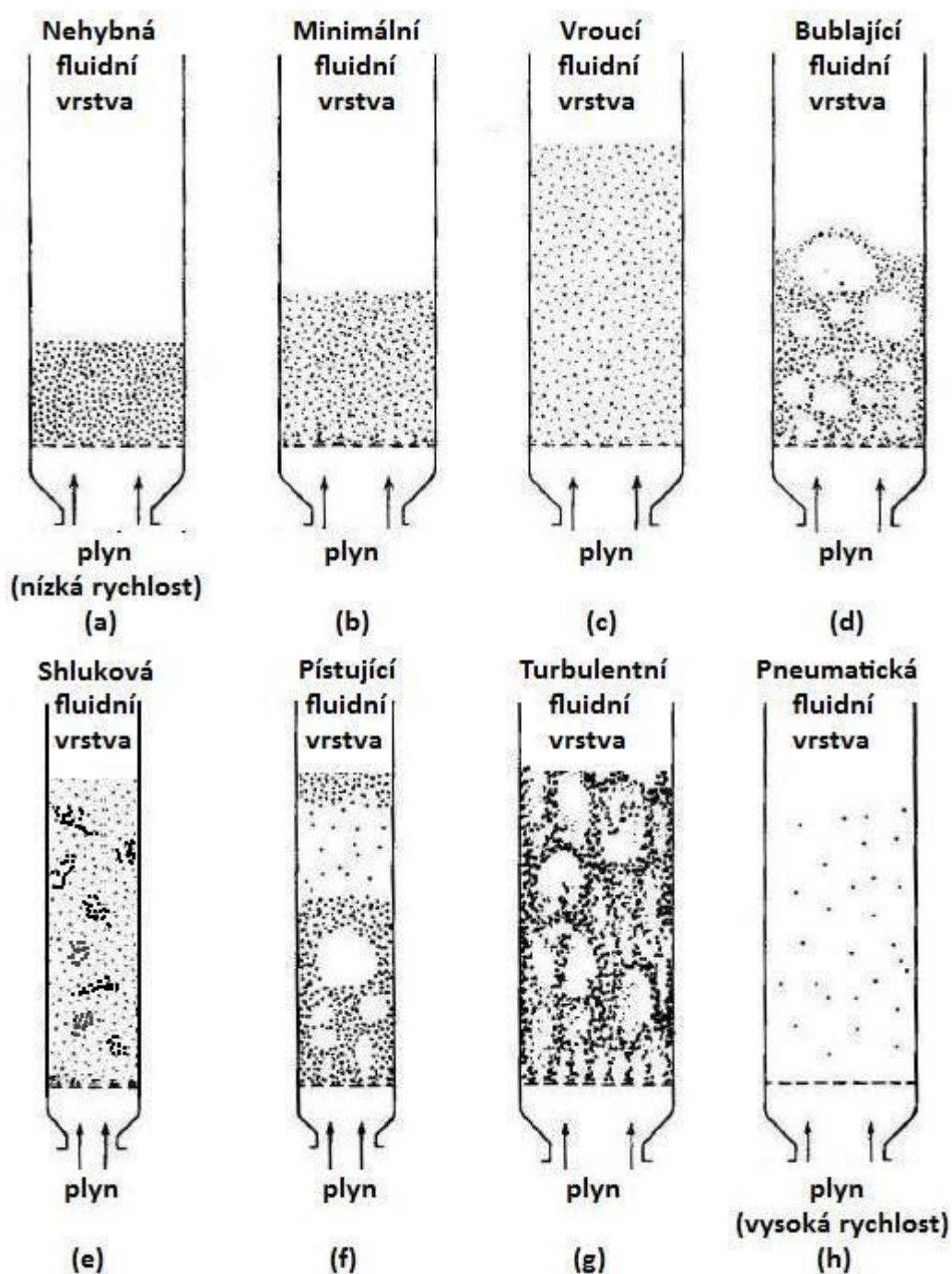
Obrázek 1: Analogie vlastností fluidní vrstvy s reálnou kapalinou [1]

2.2.1 Základní typy fluidních vrstev

Charakteristickým znakem fluidní vrstvy je kontakt mezi pevnými částicemi a protékajícím médiem. Mezi hlavní ovlivňující parametry patří rychlost a viskozita protékajícího média, výška a tvar fluidní vrstvy a konstrukce roštu. V praxi se setkáváme s několika typy fluidních vrstev, které dělíme na rovnoměrné (obr.2 (a,b,c)) a nerovnoměrné fluidní vrstvy (obr.2 (d,e,f,g,h)). [1]

Ve fluidizační komoře je umístěn zrnitý materiál a přes přepážku je přiváděno fluidizační médium. Pokud je rychlost protékajícího média nízká, pak hovoříme o nepohyblivé fluidní vrstvě (obr. 2 (a)). Tedy proud média nemá dostatečnou rychlost, prostupuje mezi částicemi zrnitého materiálu a ty zůstávají v klidném stavu. [1]

S rostoucí rychlostí vstupního média je dosaženo bodu, kdy všechny částice jsou nadnášeny proudem média. Takto vzniklá fluidní vrstva se označuje jako minimální fluidní vrstva (obr. 2 (b)). [1]



Obrázek 2: Typy fluidní vrstvy [1]

V praxi hlavně v energetice při spalování se nejčastěji využívá vroucí vrstva (obr. 2 (c)). Hlavní výhodou vroucí vrstvy je její klidná dobře měřitelná hladina, která svým vzhledem připomíná hladinu vroucí kapaliny. [1]

Bublinová fluidní vrstva (obr. 2 (d)) je charakteristická svými bublinami procházejícími vrstvou. Velikost těchto bublin je menší než průměr fluidizační komory a je nepravidelná. V praxi je tento typ fluidní vrstvy nežádoucí, protože nedochází k úplné reakci mezi pevnými částicemi a protékajícím médiem. [1]

Dalším typem je shluková fluidní vrstva (obr. 2 (e)). Tento typ je typický pro fluidní vrstvy s malou střední koncentrací částic. [1]

Pístující fluidní vrstva (obr. 2 (f)) se spíše vyskytuje ve fluidizačních komorách malého průměru a s vysokou výškou fluidní vrstvy. Je druhem bublající fluidní vrstvy. Vzniklé bubliny postupují směrem vzhůru od roštu a nabývají na svém objemu. Někdy až na velikost průměru komory. Na hladině vrstvy dochází k jejich rozpadu. V praxi je tento typ vrstvy nežádoucí. [1]

Se zvyšující rychlostí proudícího média je dosaženo bodu, kdy fluidní vrstva se stává turbulentní (obr. 2 (g)). [1]

Po ještě dalším zvýšení rychlosti proudícího média jsou pevné částice transportovány spolu s médiem z fluidní komory. Vzniklá suspenze částic a média putuje do cyklonu, kde dojde k separaci částic a proudu média. Separované částice putují zpět do fluidní vrstvy. Tento stav označuje jako pneumatická fluidní vrstva (obr. 2. (h)). [1]

2.3 Základní pojmy

Mezi základní pojmy charakterizující fluidní vrstvu patří tlaková ztráta fluidní vrstvy, prahová rychlost fluidace, prahová rychlost úletu částic, expanze fluidní vrstvy, mezerovitost fluidní vrstvy, velikost a tvar částic.

2.3.1 Tlaková ztráta fluidní vrstvy

Tlaková ztráta fluidní vrstvy Δp je dána rozdílem tlaku mezi horní a dolní hladinou fluidní vrstvy.

Jednoduchým výpočtem lze konstatovat, že tlaková ztráta je rovna tíhové síle částic působících na vnitřní průřez fluidní komory (2.1). Odporovou sílu F_R dostaneme odečtením vztlakové síly F_{Ar} od síly objemové F_V (2.2). Vyjádření objemové F_V a vztlakové síly F_{Ar} v gravitačním poli je popsáno v rovnicích (2.3) a (2.4). Spojením rovnic (2.1), (2.3) a (2.4) dostaneme vzorec pro výpočet tlakové ztráty ve fluidní vrstvě (2.5). Objem částic V_s se nahradí jejich hmotností m_s a při použití plynu jako fluidačního média lze hustotu tekutiny zanedbat. Tlakovou ztrátu lze pak počítat dle rovnice (2.6). Pokud by se vycházelo z objemu fluidní vrstvy V_B a její mezerovitosti ε (2.7), tak po dosazení do rovnice (2.5) dostaneme po úpravě vzorec (2.8). [5]

$$\Delta p = \frac{F_R}{S} \quad (2.1)$$

$$F_R = F_V - F_{Ar} \quad (2.2)$$

$$F_V = V_s \cdot \rho_s \cdot g \quad (2.3)$$

$$F_{Ar} = V_s \cdot \rho_f \cdot g \quad (2.4)$$

$$\Delta p = \frac{V_s \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{S} \quad (2.5)$$

$$\Delta p = \frac{m_s \cdot g}{S} \quad (2.6)$$

$$V_s = (1 - \varepsilon) \cdot V_B \quad (2.7)$$

$$\Delta p = h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g \quad (2.8)$$

2.3.2 Prahová rychlost fluidace

Prahová rychlost fluidace u_{mf} popisuje moment, kdy se nehybná vrstva částic díky průtoku fluidačního média začne měnit ve vrstvu pohyblivou (fluidní). Tedy fluidace začíná v okamžiku, kdy se síla proudícího média vyrovná tíze částic. Pro výpočet minimální fluidační rychlosti je v literatuře uváděno nespočet empirických

vztahů. Pro tuto práci jsem použil Chitesterův vzorec (2.9). Kde Archimédovo číslo je definované vztahem (2.10) a Reynoldsovo číslo (2.11). Po Dosazení vztahů (2.10) a (2.11) do (2.9) dostaneme rovnici pro výpočet minimální fluidační rychlosti (2.12). [1]

$$Re_{p,mf} = [(28,7^2) + 0,0494 \cdot Ar]^{0,5} - 28,7 \quad (2.9)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \quad (2.10)$$

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_f}{\mu} \quad (2.11)$$

$$u_{mf} = \left[(28,7^2) + 0,0494 \cdot \left(\frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \right) \right]^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu}{d_p \cdot \rho_f} \right) - 28,7 \cdot \left(\frac{\mu}{d_p \cdot \rho_f} \right) \quad (2.12)$$

2.3.3 Prahová rychlost úletu

Rychlost, při které jsou pevné částice unášeny v proudu fluidačního média z prostoru fluidního zařízení, nazýváme prahovou rychlostí úletu. Tuto rychlost lze spočítat pomocí Fedorova vztahu (2.13). Uvažujeme, že k dispozici máme kulové a nekulové částice s rozdílnou hodnotou C_D . Spojením vztahů (2.11) a (2.13) dostaneme vztah (2.14). [1], [2]

$$v_t = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_p \cdot (\rho_s - \rho_f)}{3 \cdot \rho_f \cdot C_D}} \quad (2.13)$$

$$C_D \cdot Re_p^2 = \frac{4 \cdot g \cdot d_p^3 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot \rho_f}{3 \cdot \mu^2} \quad (2.14)$$

Další možností, jak určit prahovou rychlost úletu kulových částic, je použití analytických vztahů pro vyjádření součinitele odporu vzduchu C_D . [1]

pro $Re_p < 0,4$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (2.15)$$

pro $0,4 < Re_p < 500$

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad (2.16)$$

pro $500 < Re_p < 200\,000$

$$C_D = 0,43 \quad (2.17)$$

Po zjištění Reynoldsova čísla a dosazení hodnot C_D do rovnice (2.13) dostaneme následující vztahy pro výpočet prahové rychlosti úletu. [1]

pro $Re_p < 0,4$

$$v_t = \frac{(\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta_g} \quad (2.18)$$

pro $0,4 < Re_p < 500$

$$v_t = \sqrt[3]{\frac{4}{255} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f)^2 \cdot g^2}{\eta_g \cdot \rho_f}} \cdot d_p \quad (2.19)$$

pro $500 < Re_p < 200\,000$

$$v_t = \sqrt{\frac{3,1 \cdot d_p \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (2.20)$$

2.3.4 Mezerovitost fluidní vrstvy

Fluidní vrstva je tvořena částicemi a volným prostorem skrze něj proudí fluidační médium. Tento prostor nazýváme mezerovitostí fluidní vrstvy a označujeme ji ε . Mezerovitost fluidní vrstvy můžeme vyjádřit jako podíl volného objemu ve fluidní vrstvě V_F k celkovému objemu fluidní vrstvy V_B (2.21) nebo pomocí vlastního objemu vrstvy částic V_{SB} a celkového objemu fluidní vrstvy V_B (2.22). [3]

$$\varepsilon = \frac{V_F}{V_B} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon = \frac{V_B - V_{SB}}{V_B} = 1 - \frac{V_{SB}}{V_B} \quad (2.22)$$

2.3.5 Charakterizace tvaru a velikosti částice (Geldartovo rozdělení částic)

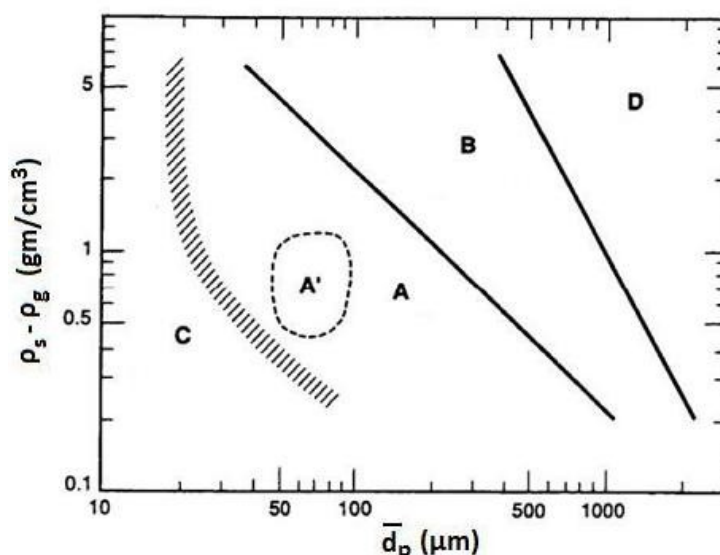
Profesor Derek Geldart rozdělil částice pohybující se ve fluidní vrstvě do čtyř kategorií od A do D. Hlavní ovlivňující faktor podle Geldartového rozdělení je velikost částice d_p a rozdíl hustot částic ρ_s . Jednotlivé kategorie částic jsou znázorněny na obrázku 3. [1]

Skupina **C** je tvořena velmi jemnými materiály, jako jsou např. mouka, škrob nebo dámský pudr. Soudržné kohezivní síly mezi částicemi jsou větší než silové účinky proudící tekutiny. Fluidace těchto částic je velmi obtížná. [1]

Skupina **A** zahrnuje materiály s malou velikostí částic a hustotou do $1,4 \text{ [g.cm}^3\text{]}$. Tyto částice snadno vytvářejí fluidní vrstvu a při zvýšené rychlosti nad prahovou rychlost fluidace vzniká bublající fluidní vrstva. Příkladem je fluidní katalytické krakování (FCC). [1]

U skupiny **B** se bublinová fluidní vrstva vytváří hned při prahové rychlosti fluidice. Částice mají velikost $40 - 500 \text{ [}\mu\text{m]}$ a hustotu mezi $1,4 - 4 \text{ [g.cm}^3\text{]}$. [1]

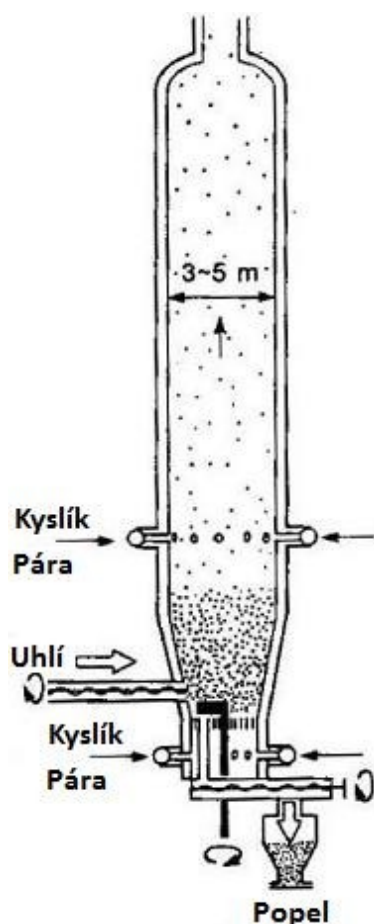
Skupina **D** je tvořena velkými částicemi v řádech milimetrů. Díky nevyzpytatelnému chování částic je fluidace obtížná. Příkladem takových částic je sušení obilí a hrachu, pražení kávových zrn nebo pukání kukuřice. [1]



Obrázek 3: Geldartovo rozdělení částic [1]

2.4 Historický vývoj fluidní techniky

Počátek moderního chápání a rozvoje fluidní techniky řadíme do konce dvacátých let 20. století. První fluidní reaktor vyvinul v roce 1926 německý chemik Fritz Winkler. Tento reaktor (obr. 4) sloužil ke zplyňování uhlí. K dalšímu rozvoji nové fluidní technologie došlo během druhé světové války, kdy vzrostla poptávka po benzínu a naftě a celkově po zdrojích energie. Ve Spojených státech amerických a v Německu během druhé světové války vyráběli pomocí Fischer-Tropschovy reakce vysoce kvalitní benzín ze zemního plynu. V roce 1942 byl postaven první reaktor pro fluidní katalytické krakování (FCC) ropy v rafinerii Standart Oil (dnes ExxonMobil) v Baton Rouge v USA. Fluidní reaktory nacházejí široké uplatnění v průmyslu, hutnictví a v energetice již několik desetiletí. Dobrým příkladem z průmyslu je pražení pyritů pro výrobu kyseliny sírové. V Evropě vyrábí fluidní reaktory pro toto pražení firma Lurgi. [1]



Obrázek 4: Winklerův reaktor na zplyňování uhlí [1]

2.5 Koncepce fluidních kotlů

Koncepční řešení fluidních kotlů vždy závisí na účelu, pro který byl konkrétní kotel postaven. Jedním z možných rozdělení fluidních kotlů spalujících pevná paliva je podle charakteristiky fluidní vrstvy. Takto dělíme fluidní kotle na kotle se stacionární, expandující a cirkulující fluidní vrstvou. Dalším používaným typem rozdělení je podle teplotní úrovně, kdy rozlišujeme kotle se škvárujícím a bezškvárovým procesem ve fluidní vrstvě. Mezníkem mezi oběma procesy je teplota fluidní vrstvy. V praxi je to teplota okolo 1000 [°C]. [7]

2.5.1 Fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou

Pro stacionární fluidní vrstvu je charakteristická zřetelná hladina a poměrně velký úlet pevných částic, které jsou odvedeny do vhodných zásobníků nebo jsou vráceny zpět do fluidní vrstvy. Kotle se stacionární fluidní vrstvou mohou pracovat ve spalovacím nebo zplyňovacím režimu. Dělítkem mezi oběma režimy je součinitel přebytku vzduchu α . [7]

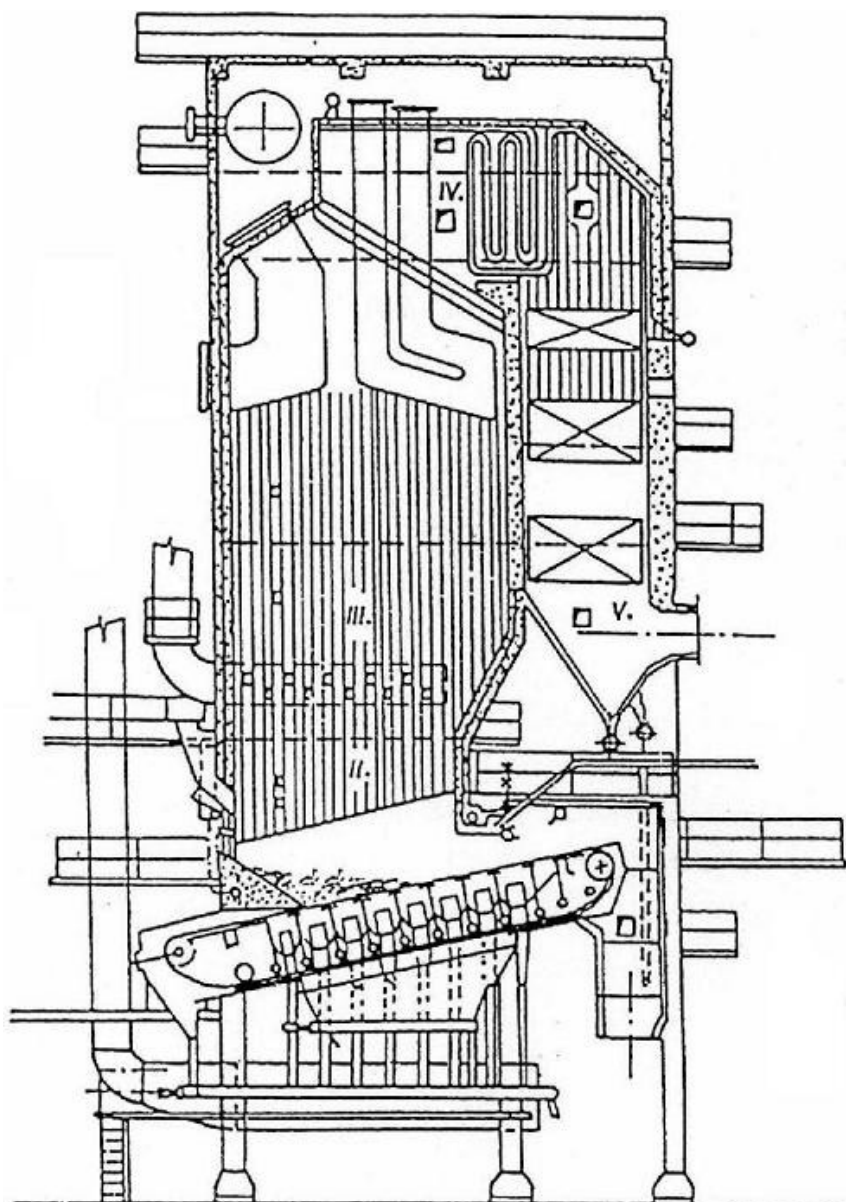
Pro spalovací režim je přebytek vzduchu $\alpha > 1$. U tohoto typu je fluidní vrstva tvořena 95 – 98 [%] inertním materiálem a 2 – 5 [%] palivem. Teplota spalování se pohybuje v rozmezí 850 – 900 [°C] a její regulace je zajištěna pomocí teplosměnných ploch, které jsou umístěny uvnitř fluidní vrstvy. [7]

Zplyňovací režim pracuje s přebytkem vzduchu $\alpha < 1$. Složení fluidní vrstvy je z inertního materiálu 80 [%] a z paliva 20 [%]. Během zplyňování se z fluidní vrstvy uvolňují plyny (převážně CO), a ty spolu se sekundárním vzduchem dohořívají v II. stupni. Podobně jako u spalovacího režimu, tak i zplyňovacího režimu je snaha o získání co nejčistšího plynu, zbaveného spalitelných částic paliva v úletu. [7]

Dalším typem fluidního kotle se stacionární fluidní vrstvou je kotel se škvárující fluidní vrstvou. Tento typ kotle je v České republice známý pod označením IGNIFLUID (obr. 5). Pro kotle IGNIFLUID jsou ideální černé kaloricky kvalitní druhy uhlí (antracit). Granulometrie paliva se pohybuje do 20 [mm]. Částice paliva vstupují do kotle, kde dochází k odplynění při $\alpha < 1$ a teplotě 1100 – 1200 [°C]. Vzniklé plyny dohořívají spolu

se sekundárním vzduchem nad fluidní vrstvou při teplotě 1200 – 1300 [°C]. Zbylé neodplynné částice paliva a popelovin se spékají a silou gravitace se pohybují směrem dolů k pásovému roštu, který je ve svislém směru vynáší ven z kotle. Výhodou je možnost odstavení kotle do mnohahodinové rezervy. [7]

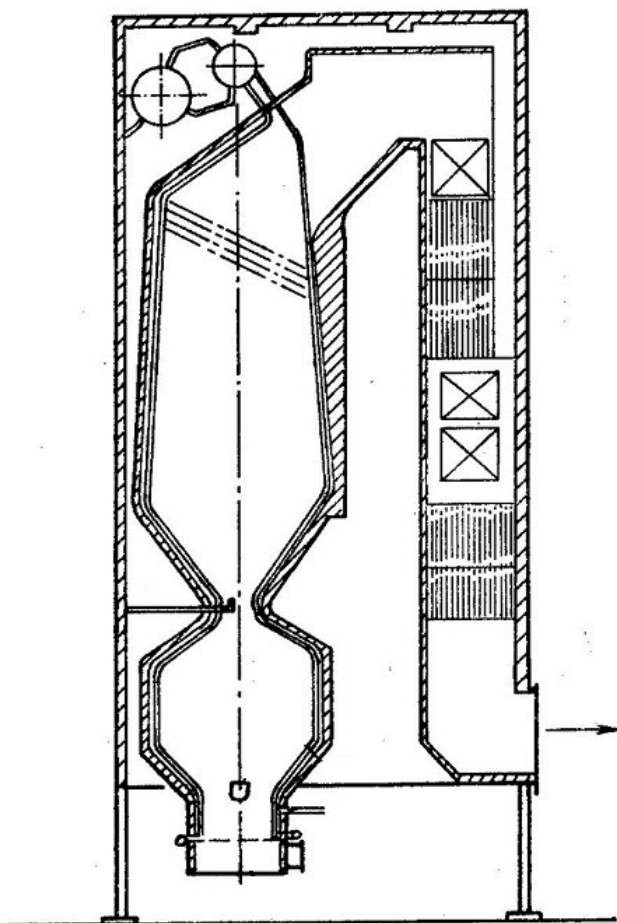
V praxi se ukázalo, že fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou mají určité nevýhody. Hlavní nevýhody jsou vyšší tvorba plynných emisí CO, velký úlet pevných částic z fluidní vrstvy, složitější regulace teploty fluidní vrstvy a výkonu kotle. [7]



Obrázek 5: Schéma fluidního kotle typu IGNIFLUID [7]

2.5.2 Fluidní kotle s expandující fluidní vrstvou

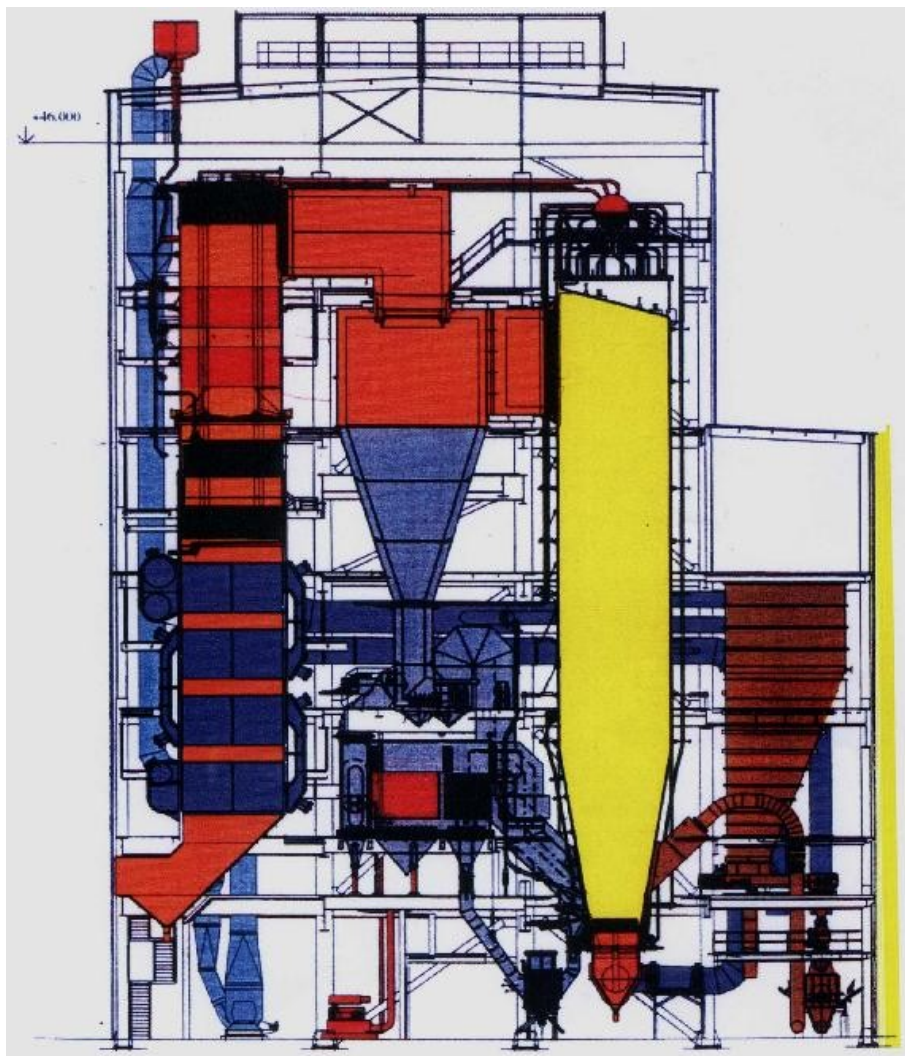
Pro expandující fluidní vrstvu je charakteristická cirkulace fluidní vrstvy mezi roštem a koncem ohniště. Tedy veškerá cirkulace probíhá ve fluidní komoře, a proto tyto kotle dostali též označení jako tzv. kotle s vnitřní cirkulací. V České republice je tento typ reprezentovaný systémem DUKLAFLUID. Konceptně se jedná o dva typy dvoustupňového fluidního ohniště. V prvním případě je fluidní ohniště přiřazeno bočně ke spalovací komoře. V druhém případě je pak fluidní zplyňovací reaktor umístěn ve spodní části a nad ním je umístěna spalovací komora. Dělítkem obou komor představuje zúžený průřez (obr. 6). Hlavní výhodou systému DUKLAFLUID je možnost spalování nízkovýhřevných druhů uhlí s vyšším obsahem popela s výhřevností od 5 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Dále lze spalovat hlušinu a tekuté odpady. Podobně jako u IGNIFLUIDU je i systém DUKLAFLUID schopen přejít do mnohahodinové rezervy. [7], [2]



Obrázek 6: Schéma fluidního kotle typu DUKLAFLUID [2]

2.5.3 Fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou

U fluidních kotlů s cirkulující fluidní vrstvou dochází k cirkulaci částic paliva, inertu, aditiva a spalovacího vzduchu mezi spalovací komorou a cyklónem. Rychlost fluidace je vyšší než u předešlých typů a není zde zřetelná hladina. Palivo spalované v cirkulující fluidní vrstvě má menší granulometrie. Pevné částice uvolněné z fluidní vrstvy se odlučují ze spalin v cyklónu a následně putují zpět do fluidní vrstvy. Tento děj se opakuje a tím je zajištěna delší doba setrvání částic ve spalovacím prostoru, což vede k lepšímu prohoření částic paliva a snížení ztráty mechanickým nedopalem. Kotle s cirkulující fluidní vrstvou mají možnost využít suché aditivní metody k odsíření spalin. Konkrétně se spolu s drceným palivem přidává mletý vápenec CaCO_3 . [7]



Obrázek 7: Schéma cirkulujícího kotle K12 v ENERGETICE Třinec [7]

2.6 Paliva spalována ve fluidních ohništích

Využitím fluidní techniky v praxi zvyšuje energetickou bezpečnost státu a také účinnost energetického mixu. Ve fluidních ohništích můžeme spalovat energeticky chudá paliva nebo odpad vznikající při těžbě uhlí. Dále lze spalovat pevný komunální odpad nebo jiný kapalný odpad. Samozřejmostí je dodržení příslušných podmínek daných legislativou pro nakládání s odpadem a dodržení emisních limitů pro dané palivo.

2.6.1 Složení paliva

Druh paliva a jeho vlastnosti hraje zásadní roli při navrhování fluidního ohniště. Pro spalování ve fluidních kotlích je důležité dodržet základní granulometrie paliva před vstupem do fluidní komory. K dodržení stanovených parametrů slouží homogenizační drtiče, které upraví vstupní palivo na potřebnou granulometrii. Dalším ovlivňujícím parametrem paliva je jeho výhřevnost. Fluidní kotle jsou schopny spalovat paliva s výhřevností od cca 5 [MJ.kg⁻¹]. Takovou výhřevnost mají jílovité uhlí, kapucíny nebo odpady vznikající při úpravách uhlí. Výhřevnost paliva ovlivňuje převážně obsah vody a popela v palivu. [2]

2.6.2 Spalování pevných paliv

Do skupiny pevných paliv spalovaných ve fluidních ohništích patří černé a hnědé uhlí, různé druhy biomasy a také tuhý komunální odpad. Hlavní výhodou fluidní techniky je schopnost zpracovat a využít méněhodnotné paliva nebo odpady, které by nešly zpracovat jiným způsobem a skončily by na skládce. [2]

2.6.3 Spalování kapalných paliv

Kapalnými palivy rozumíme ropné deriváty a kapalné odpady. Spalování kapalných paliv ve fluidní vrstvě má význam, pokud tato paliva mají vysokou viskozitu nebo jsou silně znečištěná a nelze je zpracovat v klasických typech hořáků. Tímto

způsobem se převážně spalují vysokoviskózní dehty a mazutové zbytky. Použití fluidních ohnišť je ideálním řešením pro spalování kapalných odpadů. Takto lze likvidovat odpady i s 80 [%] obsahem vody bez přídavku jiného stabilizačního paliva. Další nespornou výhodou fluidních ohnišť je možnost spalovat různé organické sloučeniny, které nelze likvidovat jiným způsobem. Mezi takové sloučeniny patří různé organické jedy, kyanidy a fenoly. [2]

2.7 Vliv fluidního spalování na životní prostředí

Nahrazení klasických práškových ohnišť reaktory fluidními by mělo pozitivní vliv na životní prostředí. Tvorba emisí během spalovacího procesu u fluidních reaktorů je nižší oproti práškovým ohništím. Nespornou výhodou fluidního spalování je možnost termicky zpracovat odpadní paliva, která by nešla pro svou nízkou výhřevnost jiným způsobem využít a skončila by na skládce. Další výhodou fluidních kotlů je možnost spoluspalovat uhlí a biomasu. [2]

2.7.1 Problematika emisí

Hlavní emise vzniklé v uhelných elektrárnách zatěžující životní prostředí jsou oxidy síry (SO_x), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO) a tuhé znečišťující látky (TZL). Využitím fluidního spalování dochází ke snížení množství těchto emisí. [7]

Do skupiny emisí oxidu síry patří oxid siřičitý (SO_2) a oxid sírový (SO_3). U spalování ve fluidních kotlích je vápenec (CaCO_3) dávkován spolu s palivem přímo do spalovací komory a dochází k vzájemné reakci. Díky nižší spalovací teplotě oproti jiným typům spalování a delší době reakce dochází až k 85 % redukci SO_x . [9]

Při spalování uhlí vzniká převážně oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Odstraňování oxidu dusíku (denitrifikace) probíhá ve fluidních ohništích současně s odstraňováním oxidu síry. Tedy při snížené spalovací teplotě a snížené koncentraci kyslíku. [7]

Emise oxidu uhelnatého ovlivňují technologické podmínky spalování. Ke snížení těchto emisí přispívá správné nastavení množství kyslíku, dostatečná doba setrvání paliva ve spalovací komoře a teplotní úroveň spalování cca 850 [C°]. [7]

Tuhé znečišťující látky (prachy) jsou jemné částice různé velikosti, tvaru, původu, složení a struktury, které jsou unášeny odpadním plynem z komína do ovzduší. Důležitým parametrem TZL je velikost částic. Rozlišujeme dvě hlavní frakce a to PM₁₀ a PM_{2,5}. Frakce PM₁₀ (hrubá prachová částice) zahrnuje částice s aerodynamickým průměrem do 10 [μm] a frakce PM_{2,5} (jemná prachová částice) s aerodynamickým průměrem do 2,5 [μm]. K snížení množství TZL vypouštěných do ovzduší je u fluidních kotlů řešeno pomocí cyklónu a dále průchodem spalin přes elektrostatický odlučovač, který pracuje s účinností přes 99 [%]. [10]

2.8 Shrnutí výhod a nevýhod fluidního spalování

Spalování ve fluidním loži jako každé jiný typ spalování má své charakteristické výhody a nevýhody.

2.8.1 Výhody fluidního spalování

1. Pevné částice reagují celým svým povrchem s tekutinou (plynem).
2. Během fluidního spalování probíhá intenzivní přenos tepla a hmoty mezi tekutinou a částicemi.
3. Nižší teplota spalování (850 °C) má příznivý dopad na redukci emisí NO_x ve spalinách.
4. Aditivní odsíření spalin přímo ve fluidní vrstvě pomocí přidaného vápence.
5. Přenos tepla mezi fluidní vrstvou a tepelným výměníkem je intenzivní a proto výměníky nevyžadují tak velké teplosměnné plochy.

6. Možnost spalování odpadů a méněhodnotných paliv s nižší výhřevností, které by nemohly být spalovány jiným způsobem.
7. Možnost kombinovaného spalování více paliv.
8. Palivo může být drceno na větší granulometrii a tím vzniká úspora energie potřebné na drticí mlýny.
9. Fluidní zařízení jsou konstrukčně jednoduché (menší rozměry roštů).

2.8.2 Nevýhody fluidního spalování

1. Vyšší opotřebení zařízení díky abrazivním účinkům pevných částic.
2. Úlet méně hmotných nedohořelých částic.
3. V bublající vrstvě nedochází k intenzivnímu kontaktu mezi proudící tekutinou a částicemi.
4. Velká spotřeba proudícího fluidizačního média (vzduchu).
5. Doba setrvání částice ve fluidním zařízení není díky intenzivnímu promíchávání stejně dlouhá, a tím se mění kvalita produktu.

3. Základní výpočty fluidace a proudění

Nedílnou součástí projektu je analytický výpočet „popkornového“ fluidního zařízení. Pro teoretický výpočet jsem použil rovnice z kapitoly 2.3. Cílem výpočtu bylo zjištění potřebného průtoku vzduchu pro transport popkornu ze skleněné kolony do cyklónu. Na tomto průtoku a rychlosti vzduchu závisí vhodný výběr dmýchadla. Průřez fluidní komory byl zvolen 80 [mm] a výška skleněné kolony 1 [m]. Důležitými parametry ovlivňující průběh fluidace jsou hustota ρ_s a velikost zrna d_p pukancové kukuřice a posléze popkornu. Pro následující výpočty bylo nutné určit tyto charakteristické rozměry.

3.1 Výpočet tlakové ztráty

Pro výpočet tlakové ztráty jsem použil vzorec (2.6). Průměr skleněné kolony je 80 [mm] a tlaková ztráta byla počítána pro 100 [g] kukuřice.

$$\Delta p = \frac{m_s \cdot g}{S}$$

$$\Delta p = \frac{0,1 \cdot 9,81}{\frac{\pi \cdot 0,08^2}{4}}$$

$$\Delta p = 195 [Pa]$$

$$\Delta p = 0,195 [kPa]$$

3.2 Výpočet minimálního prahu fluidace

Po použití Chitesterova vzorce (2.9) a následném dosazení Archimédova a Reynoldsova čísla jsme dostali vztah pro určení minimální fluidační rychlosti u_{mf} (2.12). Pro analytický výpočet byla použita pukancové kukuřice o hustotě $\rho_s = 721$ [kg.m⁻³] [17] a s velikostí zrna $d_p = 5 - 7$ [mm]. Po přeměně kukuřice na popkorn je pro částice popkornu charakteristická hustota $\rho_s = 33,81$ [kg.m⁻³] [17] a teoretická velikost zrn $d_p = 10 - 20$ [mm]. Díky rozdílné velikosti zrn bylo nutné v obou případech spočítat minimální a maximální prahovou rychlost fluidace.

Výpočet minimální prahové rychlosti fluidace pro kukuřici:

$$u_{mf_MIN} = \left[(28,7^2) + 0,0494 \cdot \left(\frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \right) \right]^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu}{d_p \cdot \rho_f} \right) - 28,7$$

$$\cdot \left(\frac{\mu}{d_p \cdot \rho_f} \right)$$

$$u_{mf_MIN} = \left[(28,7^2) + 0,0494 \cdot \left(\frac{(5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 1,2047 \cdot (731 - 1,2047) \cdot 9,81}{(1,82 \cdot 10^{-5})^2} \right) \right]^{0,5}$$

$$\cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right) - 28,7 \cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right)$$

$$\boxed{u_{mf_MIN} = 1,128 [m \cdot s^{-1}]}$$

Výpočet maximální prahové rychlosti fluidace pro kukuřici:

$$u_{mf_MAX} = \left[(28,7^2) + 0,0494 \cdot \left(\frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \right) \right]^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu}{d_p \cdot \rho_f} \right) - 28,7$$

$$\cdot \left(\frac{\mu}{d_p \cdot \rho_f} \right)$$

$$u_{mf_MAX} = \left[(28,7^2) + 0,0494 \cdot \left(\frac{(7 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 1,2047 \cdot (731 - 1,2047) \cdot 9,81}{(1,82 \cdot 10^{-5})^2} \right) \right]^{0,5}$$

$$\cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right) - 28,7 \cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right)$$

$$\boxed{u_{mf_MAX} = 1,373 [m \cdot s^{-1}]}$$

Výpočet minimální prahové rychlosti fluidace pro popkorn:

$$u_{mf_MIN} = \left[(28,7^2) + 0,0494 \cdot \left(\frac{(10 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 1,2047 \cdot (33,81 - 1,2047) \cdot 9,81}{(1,82 \cdot 10^{-5})^2} \right) \right]^{0,5}$$

$$\cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right) - 28,7 \cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right)$$

$$\boxed{u_{mf_MIN} = 0,321 [m \cdot s^{-1}]}$$

Výpočet maximální prahové rychlosti fluidace pro popkorn:

$$u_{mf_{MAX}} = \left[(28,7^2) + 0,0494 \cdot \left(\frac{(20 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 1,2047 \cdot (33,81 - 1,2047) \cdot 9,81}{(1,82 \cdot 10^{-5})^2} \right) \right]^{0,5} \\ \cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right) - 28,7 \cdot \left(\frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2047} \right)$$

$$\boxed{u_{mf_{MAX}} = 0,500 [m \cdot s^{-1}]}$$

3.3 Výpočet prahu úletu

První krok výpočtu prahové rychlosti úletu je určení Reynoldsova čísla (2.11). Pro výpočet se bere větší hodnota velikost zrna d_p . V dalším kroku vycházíme z podmínek, které definují vztahy pro výpočet prahové rychlosti úletu. V našem případě vyšlo Reynoldsovo číslo $Re_{p,mf}$ pro kukuřici 641,3 a pro popkorn 667,7. Tyto hodnoty splňují podmínku $500 < Re_{p,mf} < 200\,000$. Výpočet prahové rychlosti úletu tedy určím ze vztahu (2.20).

Výpočet Reynoldsova čísla pro kukuřici:

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_f}{\mu}$$

$$Re_{p,mf} = \frac{7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,373 \cdot 1,2047}{1,82 \cdot 10^{-5}}$$

$$\boxed{Re_{p,mf} = 641,1 [-]}$$

Výpočet Reynoldsova čísla pro popkorn:

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_f}{\mu}$$

$$Re_{p,mf} = \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,501 \cdot 1,2047}{1,82 \cdot 10^{-5}}$$

$$\boxed{Re_{p,mf} = 667,5 [-]}$$

Výpočet minimální prahové rychlosti úletu pro kukuřici:

$$v_{t_{MIN}} = \sqrt{\frac{3,1 \cdot d_p \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}}$$
$$v_{t_{MIN}} = \sqrt{\frac{3,1 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (721 - 1,2047)}{1,2047}}$$
$$\boxed{v_{t_{MIN}} = 9,532 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}}$$

Výpočet maximální prahové rychlosti úletu pro kukuřici:

$$v_{t_{MAX}} = \sqrt{\frac{3,1 \cdot d_p \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}}$$
$$v_{t_{MAX}} = \sqrt{\frac{3,1 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (721 - 1,2047)}{1,2047}}$$
$$\boxed{v_{t_{MAX}} = 11,278 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}}$$

Výpočet minimální prahové rychlosti úletu pro popkorn:

$$v_{t_{MIN}} = \sqrt{\frac{3,1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (33,81 - 1,2047)}{1,2047}}$$
$$\boxed{v_{t_{MIN}} = 2,869 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}}$$

Výpočet maximální prahové rychlosti úletu pro popkorn:

$$v_{t_{MAX}} = \sqrt{\frac{3,1 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot (33,81 - 1,2047)}{1,2047}}$$
$$\boxed{v_{t_{MAX}} = 4,057 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}}$$

3.4 Sumarizace analytického výpočtu

Cílem analytického výpočtu „popkornového“ fluidního zařízení bylo určit hodnoty prahových rychlostí fluidace a úletu a určit velikost tlakové ztráty. Díky těmto vypočteným hodnotám a hlavně díky znalosti prahové rychlosti úletu, mohu navrhnout vhodné dmýchadlo s potřebnými parametry. Pro lepší názornost jsem jednotlivé výsledky z analytických výpočtů uvedl do následující tabulky (tab. 1).

Tabulka analytického výpočtu				
Základní parametry fluidace	Značení	Jednotka	Kukuřice s $d_p = 5 - 7$ [mm]	Popkorn s $d_p = 10 - 20$ [mm]
Tlaková ztráta	Δp	[Pa]	195,3	195,3
Minimální rychlost fluidace	u_{mfMIN}	[m.s ⁻¹]	1,128	0,321
Maximální rychlost fluidace	u_{mfMAX}	[m.s ⁻¹]	1,373	0,500
Reynoldsovo číslo	$Re_{p,mf}$	[-]	641,1	667,5
Minimální rychlost úletu	v_{tMIN}	[m.s ⁻¹]	9,532	2,869
Maximální rychlost úletu	v_{tMAX}	[m.s ⁻¹]	11,278	4,057

Tabulka 1: Vyhodnocení analytického výpočtu

4. Výpočet proudění užitím softwaru Ansys - Fluent

Před samotnou realizací „popkornového“ fluidního zařízení byl projekt otestován pomocí simulačního modelovacího softwaru Ansys s užitím metody konečných objemů (FVM). V této kapitole je popsán princip, na jakém pracuje software Ansys – Fluent a jeho využití pro modelování „popkornového“ fluidního zařízení.

4.1 Teorie modelování proudění v softwaru Ansys - Fluent

Pro vývoj nových zařízení nebo pro kontrolu stávajících zařízení se používají různé softwary a programy, pomocí kterých lze znázornit proudění tekutin. Díky těmto programům lze teoreticky ověřit a optimalizovat různé nedostatky zařízení ještě před jejich samostatnou výrobou popřípadě určit pravděpodobná poruchová místa u stávajících zařízení.

Při výpočtech a řešeních přenosu tepla, hmoty a hybnosti máme k dispozici různé CFD (Computational Fluid Dynamics) programové systémy. Tyto systémy řeší soustavy parciálních diferenciálních rovnic pomocí numerických metod. Základní zákony zachování hmoty, hybnosti a energie jsou vyjádřeny těmito parciálními diferenciálními rovnicemi, ke kterým přistupují okrajové a počáteční podmínky. [11]

V softwaru Ansys – Fluent se užívá metoda konečných objemů. Tato metoda vychází z hypotézy o kontinuu (spojitém prostředí). U hypotézy o kontinuu je molekulová struktura tekutin nahrazena velmi malými objemy. Tyto elementární objemy mají fyzikální vlastnosti jako je hustota, teplota, tlak a rychlost. Při přechodu od jednoho k druhému se tyto elementární objemy spojitě mění. [11]

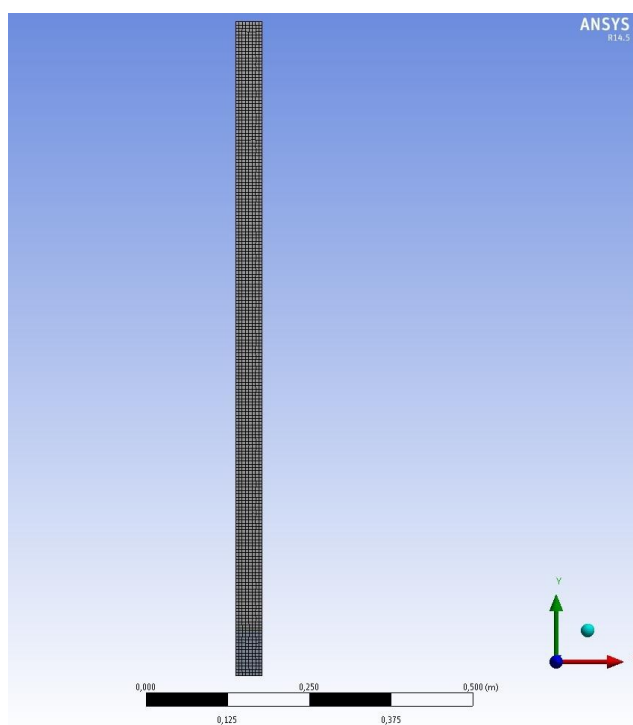
Konkrétní řešení úloh a příkladů metodou konečných objemů v softwaru Ansys – Fluent má obvykle následující postup. V prvním kroku se vytvoří základní oblast (2D nebo 3D). Tato oblast se následně rozdělí na menší elementární objemy (tvorba sítě). Dále se nadefinují vstupní a výstupní parametry a okrajové podmínky. V posledním kroku dochází k numerickému řešení diskretizovaných rovnic. [11]

4.2 Teoretický model „popkornového“ fluidního zařízení

Před samotnou realizací „popkornového“ fluidního zařízení předcházela simulace proudění v zjednodušeném modelu skleněné kolony. Prvním krokem při modelování v softwaru Ansys – Fluent je vytvoření dvojrozměrné nebo trojrozměrné geometrie. V mém případě jsem zvolil dvourozměrnou síť. U výpočtu „popkornového“ fluidního zařízení jsem se zaměřil pouze na výpočet proudění ve skleněné koloně, kterou jsem rozdělil pomocí pórovité přepážky na dvě části. Ve skleněné koloně dochází ke vznosu a posléze přenesení pevných částic do připojeného cyklónu. Matematickým výpočtem a modelování proudění v části cyklónu jsem se díky složitosti v této práci nezabýval.

Základní geometrii modelu jsem vytvořil v Design Modeler v podprogramu Ansys – Workbench. Následně jsem rozdělil základní oblast na elementární objemy s využitím křivočaré sítě. V prostředí Meshingu (podprogram Ansys – Workbench) jsem nadefinoval jednotlivé plochy modelu (inlet, outlet a wall).

Geometrie základní oblasti s vytvořenou sítí a definovanými plochami je na obrázku 8.



Obrázek 8: Geometrie základní oblasti s vytvořenou sítí

4.3 Teorie modelování proudění přes porézní vrstvu

Jedním možným typem proudění tekutin je proudění přes vrstvu zrnitého materiálu. V energetice představují zrnité materiály především černé a hnědé uhlí a biomasa. V praxi se můžeme setkat se společným prouděním plynu a kapaliny skrz zrnitý materiál, pak mluvíme o dvoufázovém proudění. Pokud protéká materiálem pouze jedna tekutina, jako v našem případě, hovoříme o jednofázovém proudění.

V praxi se porézní vrstva vyskytuje ve formě různých pórovitých přepážek (plst', keramika, papír), zrnitých vrstev (písek, šterk), různých náplních (kuličky, kroužky) nebo ve výplních (tvarované rošty, souvislé vrstvy). U „popkornového“ fluidního zařízení tvoří porézní vrstvu pórovitá přepážka (rošt), na které je umístěn zrnitý materiál (kukuřice). [12]

Pro další výpočet je nutné určit pórovitost roštu $n_{ROŠT}$ [-]. Skleněná trubka o vnitřním průměru 80 [mm] je přidělaná k nerezovému roštu s tloušťkou 3 [mm]. Počet děr v roštu je 160 a jejich průměr je 4 [mm]. Pórovitost roštu se pak vypočte podílem objemu děr $V_{DĚR}$ k celkovému objemu V_{CELK} . Výsledná pórovitost je 0,4 [-] (rov. 4.2).

$$n_{ROŠT} = \frac{V_{DĚR}}{V_{CELK}} [-] \quad (4.1)$$

$$n_{ROŠT} = \frac{6,0288 \cdot 10^{-6}}{1,5072 \cdot 10^{-5}} = \boxed{0,4 [-]} \quad (4.2)$$

Při výpočtu proudění nebylo počítáno s přenosem tepla a změnou energie, proto byl vybrán izotermní model. V dalším kroku bylo nutné určit typ proudění pomocí Reynoldsova kritéria. Rychlost protékajícího vzduchu v koloně s průměrem $d = 0,08$ [m] vychází $7,96$ [$m \cdot s^{-1}$]. Reynoldsovo číslo (rov. 4.4) nám charakterizuje turbulentní proudění. Pro výpočet v Ansysu byl zvolen RNG k- ϵ turbulentní model. Tento model je vhodný i pro nižší velikosti Reynoldsova čísla. [11]

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} [-] \quad (4.3)$$

$$Re = \frac{7,96 \cdot 0,08}{1,51 \cdot 10^{-5}} = \boxed{42\,182 [-]} \quad (4.4)$$

Vstupními parametry porézního prostředí jsou pórovitost roštu, propustnost α , koeficient změny tlaku C_2 . Výpočet tlakové ztráty provedeme pomocí Darcyho matematického vztahu (4.5). Tento matematický vztah definuje rychlost proudícího plynu porézním prostředím. Z tohoto vztahu si vyjádříme propustnost α a koeficient změny tlaku C_2 pomocí kterých definují porézní vrstvu ve Fluentu. Po měření a přepočtení mi vyšla propustnost $\alpha = 5\,907\,284,77 \text{ [m}^2\text{]}$ a koeficient změny tlaku $C_2 = 133,87 \text{ [m}^{-1}\text{]}$.

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} \cdot v + C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \right) \cdot t \quad (4.5)$$

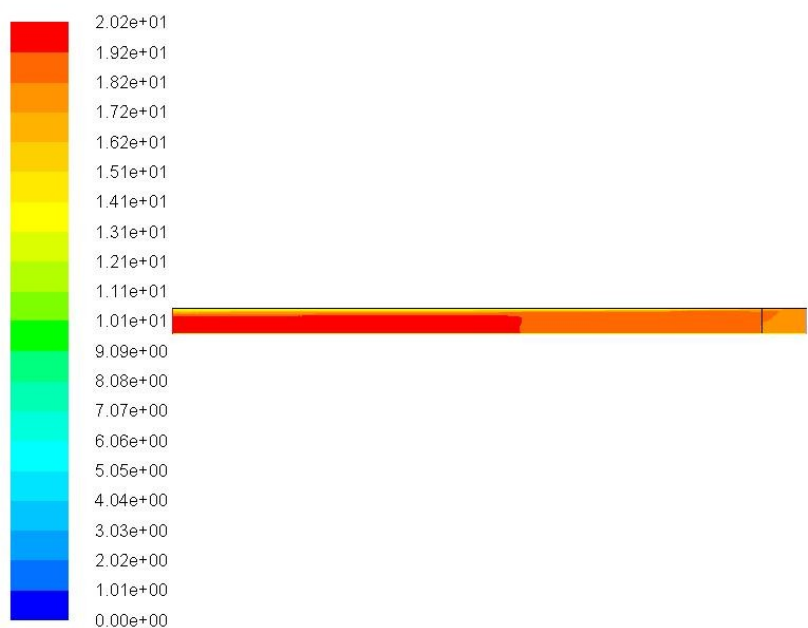
V následujícím kroku bylo nutné určit vstupní a výstupní okrajové podmínky (tab. 2).

Okrajové podmínky	Vstup vzduch	Výstup vzduch	Jednotka
rychlost v	18,87	-	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
intenzita turbulence	1	1	[%]
hydraulický průměr	0,08	0,08	[m]
tlak p	-	320	[Pa]

Tabulka 2: Okrajové podmínky

V dalším kroku bylo nutné nastavit a charakterizovat vliv a velikost částic na proudění. Pro složitost bylo upuštěno od charakterizování přeměny kukuřice na popkorn v závislosti na teplotě. Výpočet byl zaměřen pouze na zjištění vlivu vrstvy proudění na vrstvu kukuřice o charakteristickém rozměru $d_p = 6 \text{ [mm]}$, hustotě $\rho = 731 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$ a počáteční objemový zlomek částic ve fluidní vrstvě $V_B = 0,3 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$.

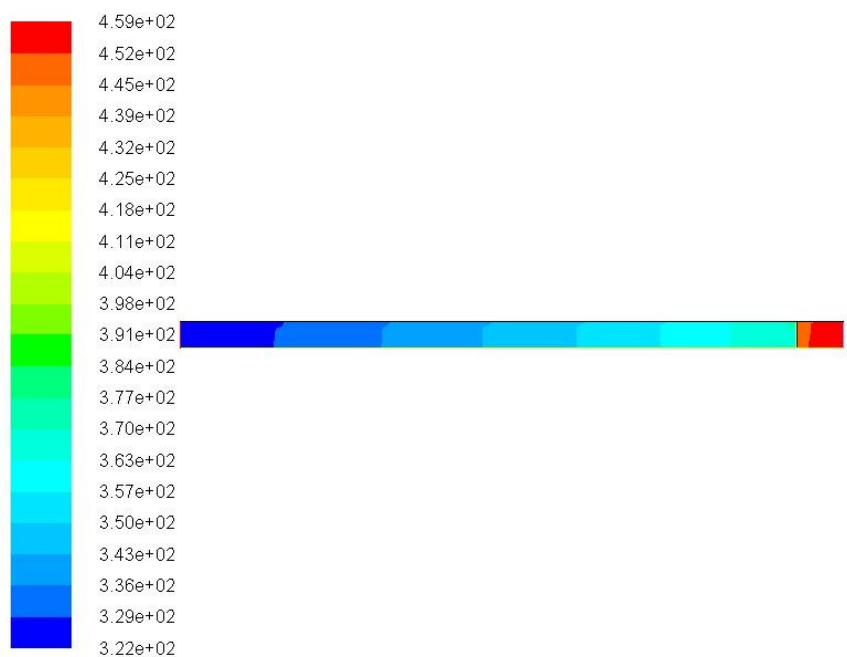
Po zadání všech potřebných parametrů následovala počáteční inicializace a patchování částic kukuřice do fluidní vrstvy a samotné spuštění výpočtu. Cílem výpočtu bylo získat časově závislé konvergentní řešení s časovým krokem $0,001 \text{ [s]}$. Následně pomocí funkce Graphics - Conturs jsem získal grafické znázornění průběhů rychlosti, tlaků a objemové zastoupení částic kukuřice v proudícím médiu. Výsledné průběhy jsou znázorněny na následujících obrázcích. Pro výslednou prezentaci je zpracována animace výsledků pomocí Graphics – Animations.



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=8.2260e+00)

May 15, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (axi, pbns, RSM, transient)

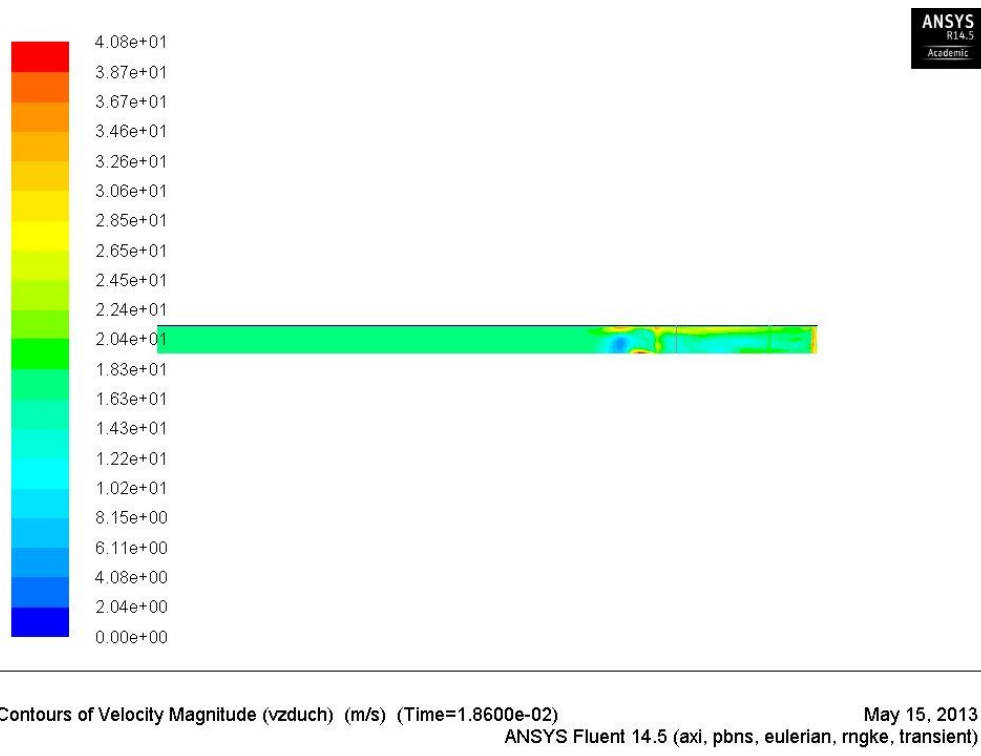
Obrázek 9: Graf rychlostního pole přes porézní prostředí



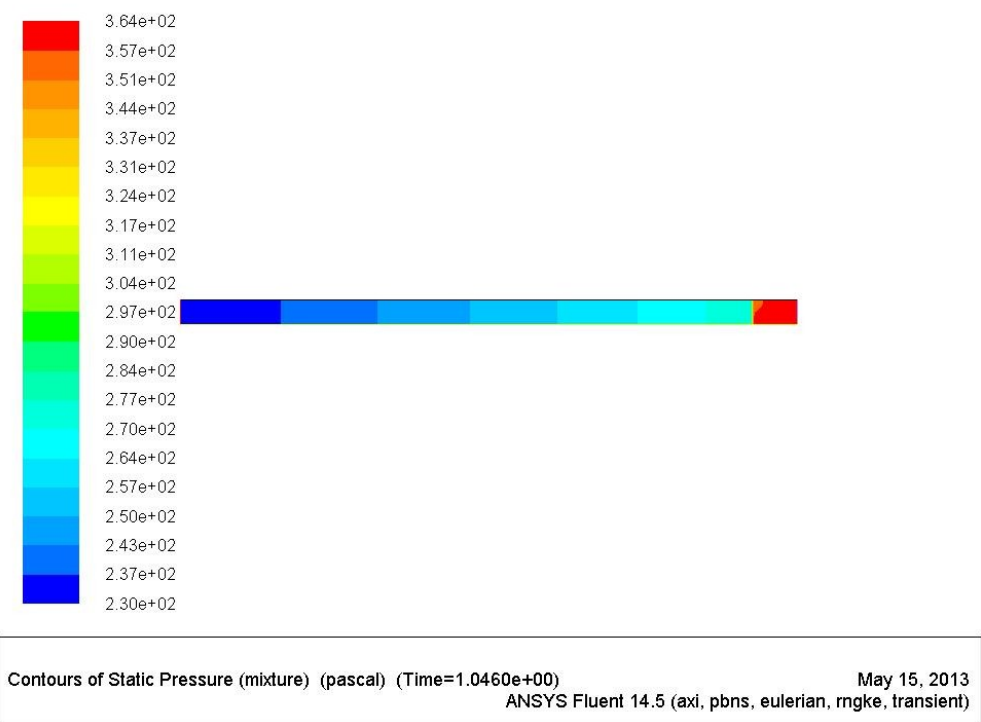
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=8.2260e+00)

May 15, 2013
ANSYS Fluent 14.5 (axi, pbns, RSM, transient)

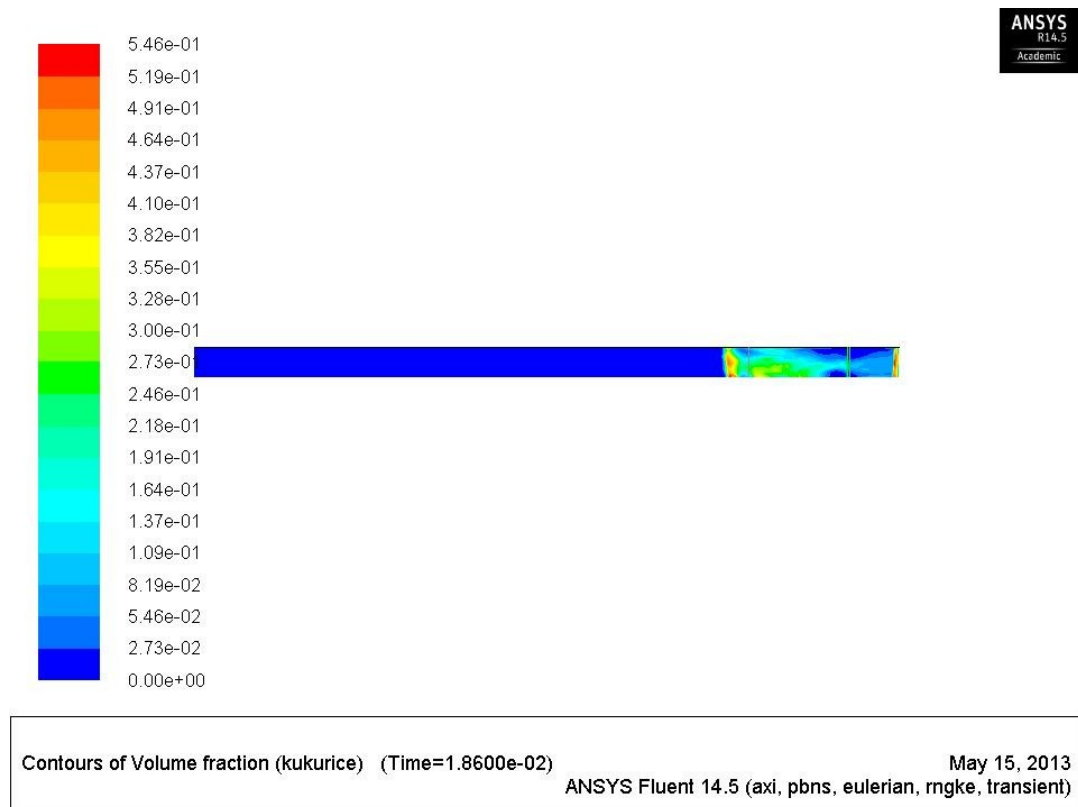
Obrázek 10: Průběh změny tlaku přes porézní prostředí



Obrázek 11: Graf rychlostního pole přes porézní prostředí s vrstvou kukuřice



Obrázek 12: Průběh změny tlaku přes porézní prostředí s vrstvou kukuřice



Obrázek 13: Objemové zastoupení částic kukuřice v proudícím médiu

Modelování v softwaru Ansys – Fluent by mělo předcházet samotné realizaci. V případě „popkornového“ fluidního zařízení, díky složitosti charakterizování vlivu částic kukuřice na proudění, bylo nutné použít okrajové podmínky z naměřeného pokusu. Na vstupu do kolony se zadávala vstupní rychlost a na výstupu z kolony se zadával výstupní tlak.

5. Realizace „popkornového“ fluidního zařízení

Na základě předběžných výpočtů a inspirace fluidním zařízením na výrobu popkornu na Technické Univerzitě Vídeň jsem vymodeloval pilotní model „popkornového“ fluidního zařízení v programu Autodesk Inventor. Po dokončení výkresové dokumentace jsem začal s vyhledáváním firem schopných mi dodat požadované díly pro realizaci mého projektu.

5.1 Výběr komponent

Již v průběhu akademického roku 2011/2012 jsem během svého výměnného pobytu ve Vídni začal kontaktovat vhodné firmy pro realizaci projektu. Po ukončení výměnného pobytu jsem měl cenové nabídky téměř na všechny hlavní části kromě skleněného cyklónu. Na začátku akademického roku 2012/2013 jsem pokračoval v hledání firmy schopné vyrobit skleněný cyklón a mezitím jsem začal objednávat jednotlivé díly pro realizaci projektu.

5.1.1 Konstrukce rámu

Pro konstrukci rámu (obr. 14) jsem vybral hliníkové profily dodávané firmou Haberkorn Ulmer s.r.o.. Výhodou této konstrukce je její nízká hmotnost, snadná montáž a mobilita, kterou zajišťují kolečka.



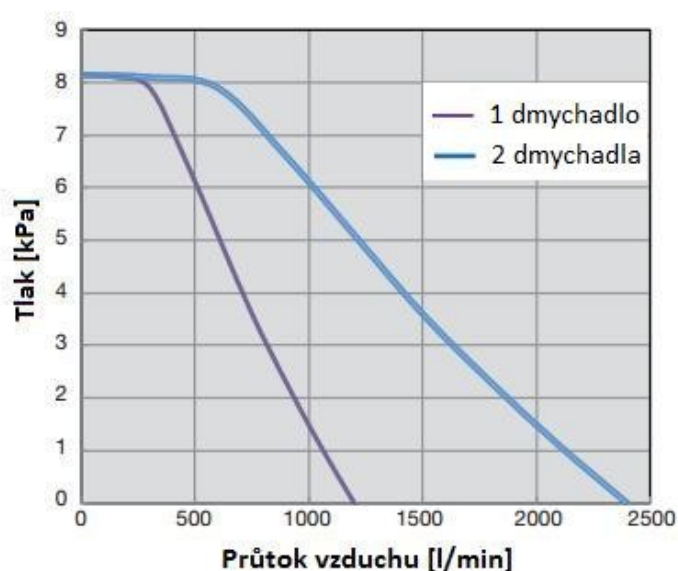
Obrázek 14: Konstrukce rámu v programu Autodesk Inventor

5.1.2 Doprava vzdušiny

Předběžného analytický výpočet prahové rychlosti úletu popkornu ze skleněné kolony vychází $v_t = 4,057 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$. Podle inspirace z Vídně bylo pro dopravu vzduchu vybráno dmýchadlo ROBUST (obr. 15) od švýcarské firmy Leister Technologies AG. Pro zaručení potřebné rychlosti a průtoku vzduchu k přemístění popkornu ze skleněné kolony do cyklónu byla pořízena dvě dmýchadla ROBUST a zapojena v paralelním zapojení. Charakteristická křivka tohoto zapojení je na obrázku 16.

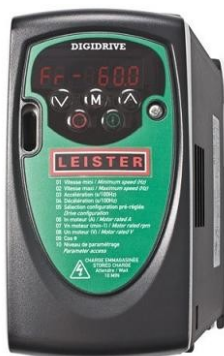


Obrázek 15: Dmýchadlo ROBUST od firmy Leister [16]



Obrázek 16: Charakteristická křivka paralelního zapojení dmýchadel ROBUST [16]

Pro regulovatelnost výkonu dmýchadel byl pořízen frekvenční měnič FC 550 (obr. 17) také od firmy Leister. Frekvenční měnič umožní dmýchadlům změnu otáček pomocí změny frekvence. Díky tomu můžeme regulovat výkon dmýchadel podle potřeby.



Obrázek 17: Frekvenční měnič FC 550 od firmy Leister [16]

5.1.3 Ohřev vzdušiny

Na ohřátí proudu vzduchu byl vybrán ohříváč vzduchu LHS 61L SYSTEM (obr. 18) od firmy Leister. Tento typ ohříváče je schopen ohřát vstupující vzduch z obou dmýchadel na požadovanou teplotu pro puknutí kukuřice. Maximální výstupní teplota vzduchu garantována výrobcem je 650 [°C]. Pro puknutí kukuřice a tedy přeměně na popkorn je nastavena teplota v rozmezí 165 – 210 [°C]. Při vyšších teplotách dochází k spékání kukuřice a následně k popkornu. Při paralelním zapojení dmýchadel ROBUST je dosaženo průtoku 2400 [l.min⁻¹] a rychlost vzduchu v skleněné koloně s průměrem 80 [mm] je 7,958 [m.s⁻¹].



Obrázek 18: Ohříváč vzduchu LHS 61L SYSTEM od firmy Leister [16]

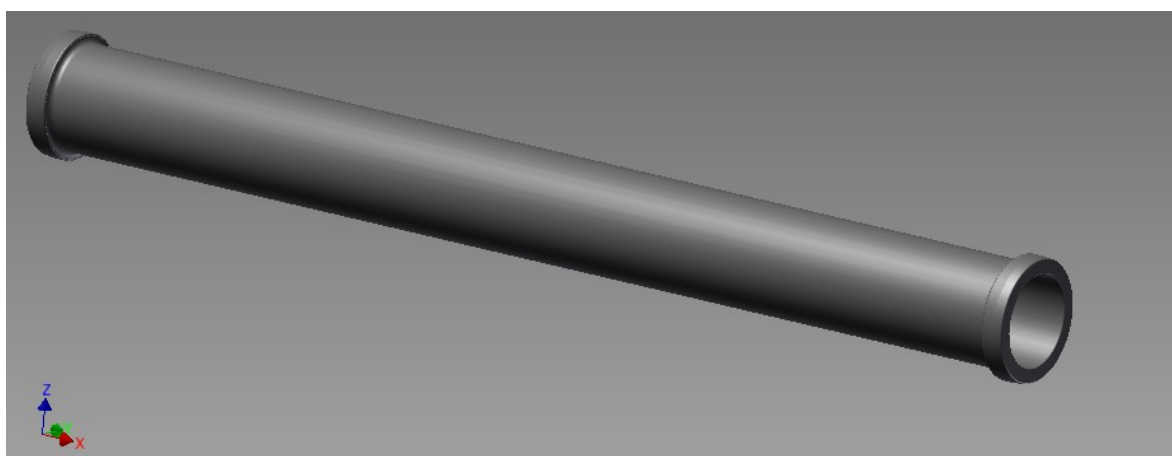
Přesnou regulaci teploty pomocí digitálního displeje zajišťuje teplotní regulátor CSS (obr. 19). Výrobce tohoto regulátoru je také firma Leister. Na digitálním displeji je zobrazována aktuální a cílová teplota, a to buď v stupních Celsia nebo Fahrenheitových stupních.



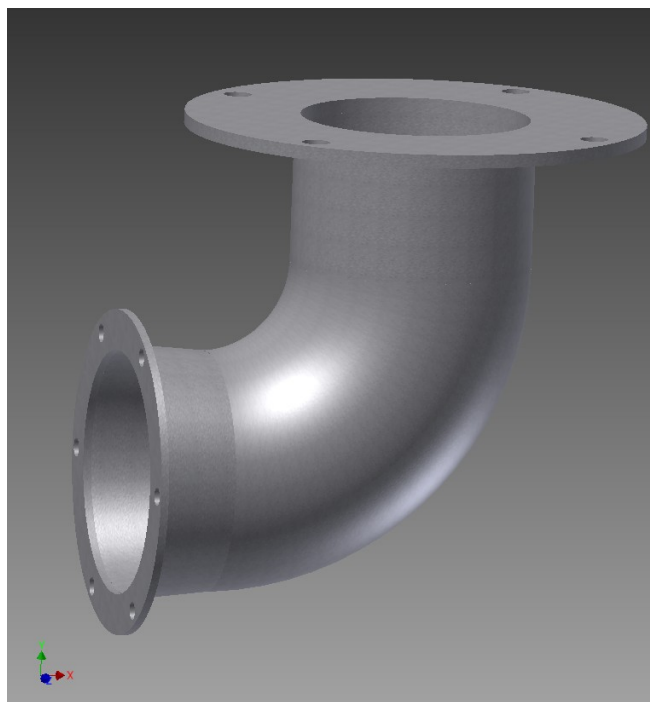
Obrázek 19: Teplotní regulátor CSS od firmy Leister [16]

5.1.4 Potrubní část

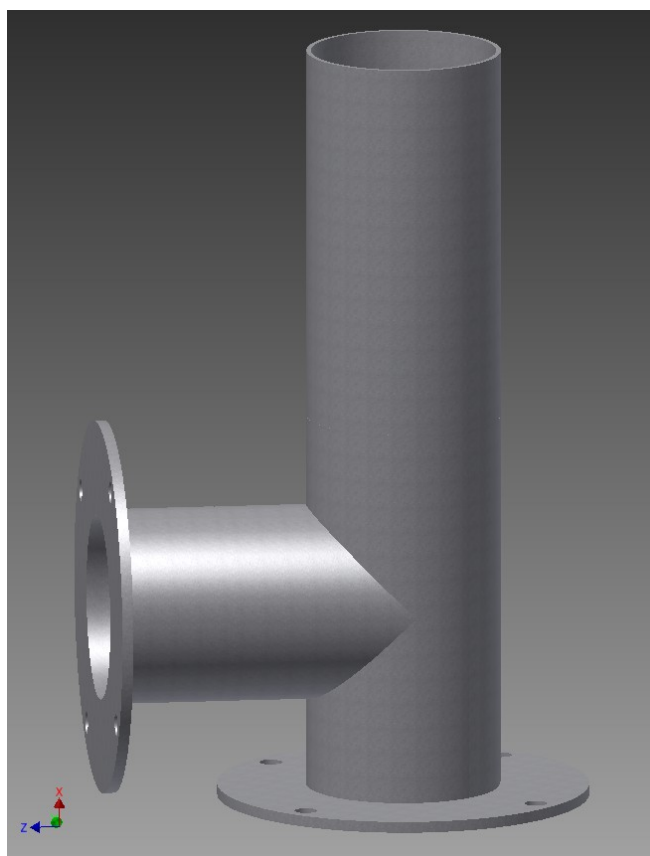
Potrubní část přístroje tvoří skleněná kolona, nerezový T-kus a nerezové koleno. Skleněnou kolonu spolu s přírubami, podložnými korály a těsněním dodala firma KAVALIERRGLASS, a.s.. Nerezové části pro koleno a T-kus dodala firma ARMATURY Group a.s.. Svaření do finální podoby jednotlivých částí provedla firma Nerez Výroba Jež s.r.o..



Obrázek 20: 3D model skleněné kolony v programu Autodesk Inventor



Obrázek 21: 3D model nerezového kolena v programu Autodesk Inventor

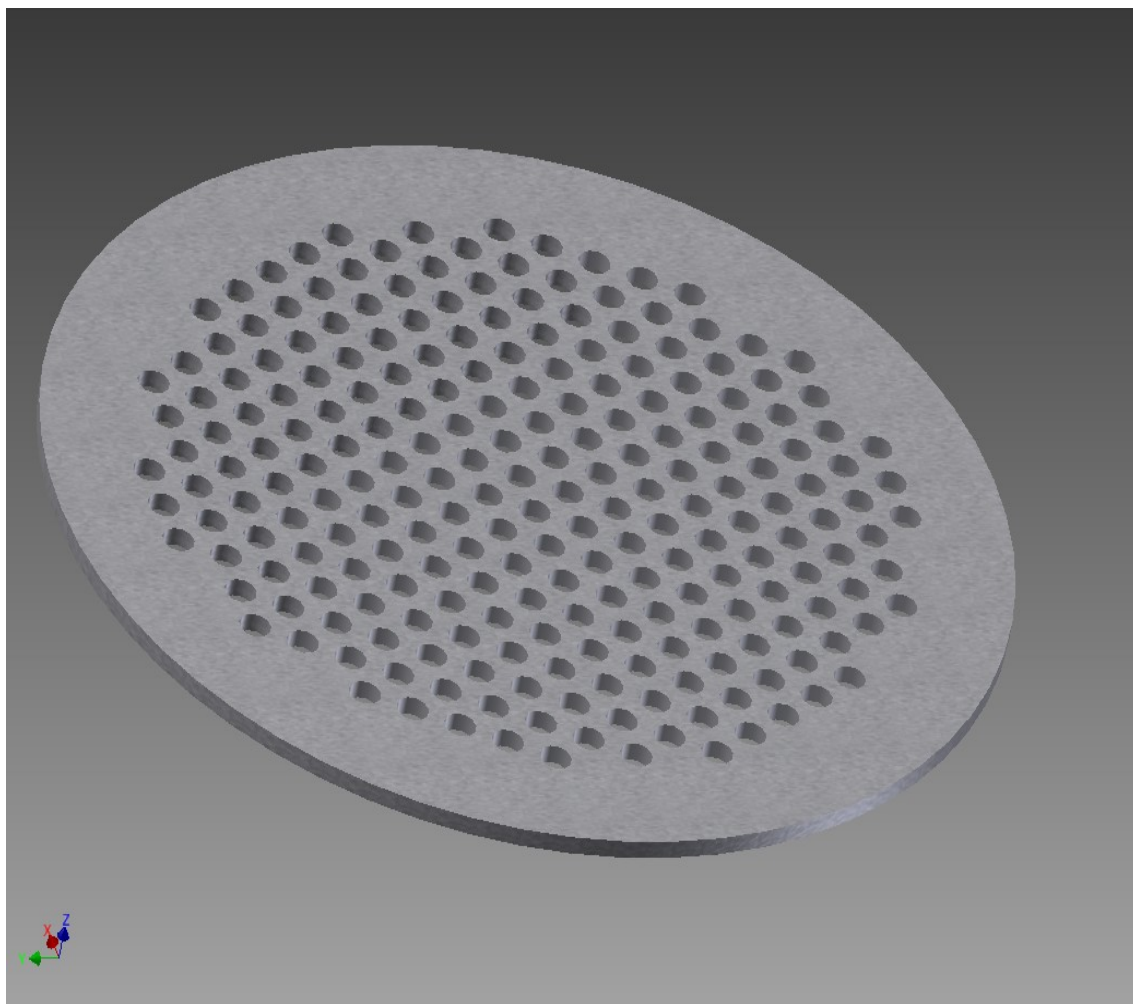


Obrázek 22: 3D model nerezového t-kusu v programu Autodesk Inventor

5.1.5 Rošt

Pro správnou fluidaci kukuřice a posléze popkornu má velký vliv vhodný výběr typu roštu. Výběr závisí především na velikosti a tvaru kukuřice a samozřejmě ceně dodaného roštu. Hlavní parametr je průměr částice a velikost děr, které zamezí propadu částic skrz děrovanou přepážku. To by ovlivňovalo tlakovou ztrátu roštu a celkově by to mělo negativní vliv na fluidaci.

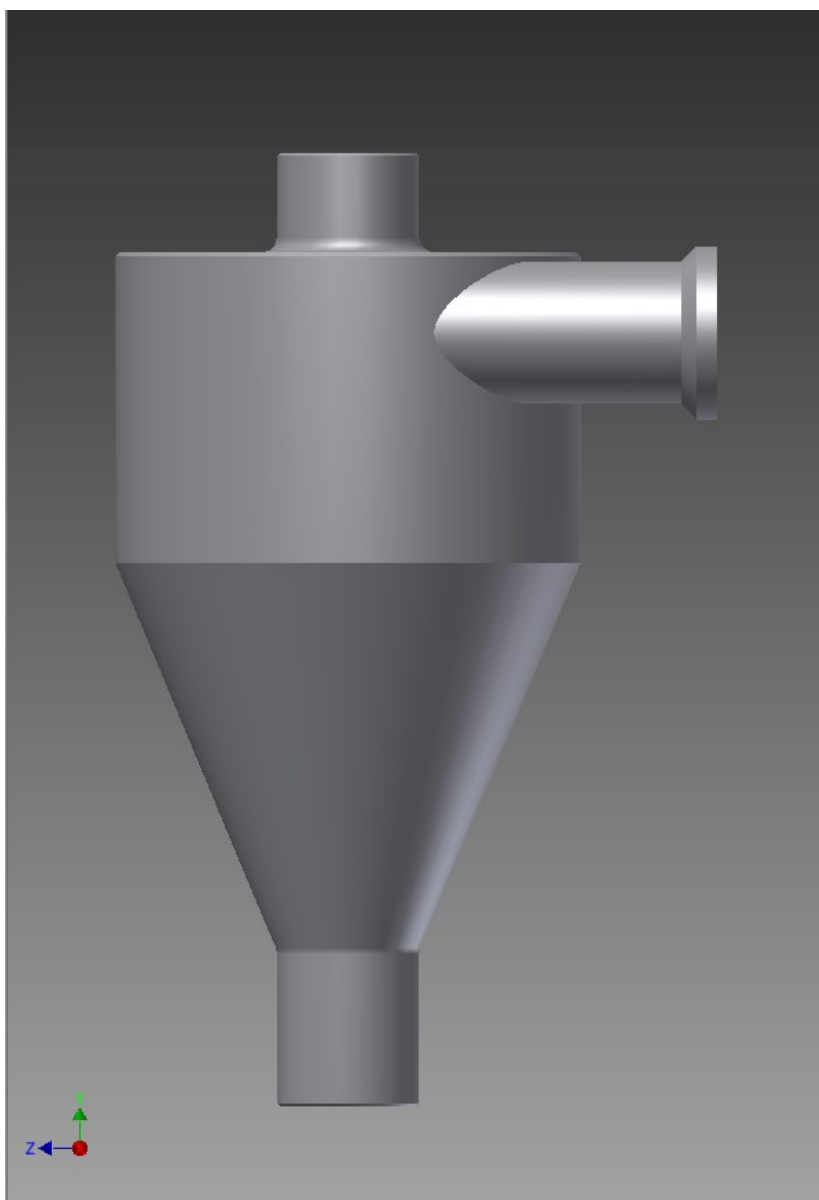
Mnou měřená kukuřice měla nejmenší průměr částic 5 [mm]. Pro finální podobu nerezového roštu jsem zvolil děrovaný plech typu Rv s průměrem děr 4 [mm] a se vzdáleností středů 6 [mm] (obr. 23). Tloušťka nerezového roštu je 3 [mm]. Tento rošt dodala firma TROJICE spol. s.r.o..



Obrázek 23: 3D model nerezového roštu v programu Autodesk Inventor

5.1.6 Cyklón

Nalezení firmy, která by byla schopna vyrobit cyklón, zabralo nejvíce času. Po kontaktování několika firem v České republice jsem na základě jejich reakcí a doporučení zjistil, že u nás není firma, která by byla schopna vyrobit skleněný cyklón, odpovídající mým parametrům. Přes rakouskou firmu jsem nakonec dostal kontakt na německou firmu G. DIEHM Process Systems, která cyklón vyrobila. 3D model cyklónu v programu Autodesk Inventor lze vidět na obrázku 24.



Obrázek 24: Model cyklónu v programu Autodesk Inventor

5.2 Sestrojení „popkornového“ fluidního zařízení

Samotné sestavení jednotlivých komponent proběhlo během akademické roku 2012/2013. V prvním kroku jsem smontoval samotný rám a umístil na něj laminátové desky. Pomocí šroubových spojení jsem na spodní desku přidělal dvě dmýchadla ROBUST a ohřívač vzduchu LHS 61L SYSTEM. Dmýchadla a ohřívač vzduchu jsem propojil pomocí vyztužené hadice. Na ohřívač vzduchu byla nasunuta příruba, ke které bylo pomocí šesti šroubů M6 přiděláno koleno. Na koleno byla postavena skleněná kolona a celý spoj byl propojen závitovou tyčí M10. Nerezový t-kus byl následně položen na vrchní část skleněné kolony a spojen čtyřmi šrouby M10. Mezi skleněnou kolonou a nerezovými částmi byl vsunut těsnící kroužek a mezi přírubu a kolonu byly vloženy korále. Nerezový t-kus byl následně ze dvou stran přichycen k rámu objímkami a závitovou tyčí M10. Na t-kus byl přidělán skleněný cyklón, taktéž pomocí příruby s korály, těsněním a čtyřmi šrouby M10. Vrchní otvor cyklónu byl zajištěn objímkami a závitovou tyčí M10. K tomuto základnímu modelu byl připojen frekvenční měnič a teplotní regulátor CSS.




Obrázek 25: Sestava „popkornového“ fluidního zařízení v programu Autodesk Inventor


6. Praktické ověření teoretických výpočtů

Po úspěšném sestrojení „popkornového“ fluidního zařízení a po uvedení do provozu jsem se pokusil ověřit teoretické výpočty. Ověření teoretických výpočtů spočívalo v zjištění tlakové ztráty roštu a fluidní vrstvy a změření průtoku vzduchu.

6.1 Použité měřicí přístroje

Snímač tlakové difference (DM)		
Typ:	FD8612DPS	
Napájecí napětí:	6 V	
Výstup:	analogový (0-10 V)	
Měřicí rozsah:	0-2500 Pa	
Přesnost:	+/-1%	
Přetížitelnost:	pěti násobná	

Tabulka 3: Parametry tlakového snímače (DM) [13]

Vyhodnocovací zařízení (A)		
Typ:	ALMEMO 2290-3	
Napájecí napětí:	9 V	
Vstup:	2 analogové vstupy	
Výstup:	2 analogové výstupy	
Výrobce:	AHLBOR Mess-und Regelungstechnik GmbH	

Tabulka 4: Parametry vyhodnocovacího zařízení ALMEMO [13]

6.2 Postup měření

Abych mohl uskutečnit měření, vyměnil jsem skleněnou kolonu za průhlednou plastovou trubku o vnitřním průměru 82 [mm] a délce 1 [m]. Plastová trubka byla rozdělená na dvě části a mezi ně byl vsunut nerezový rošt. Do trubice byla navrtána tři odběrová místa. První odběr byl pod roštem, druhý nad roštem a třetí byl umístěn na výstupu z kolony. Průtok vzduchu zajišťovala dvě dmýchadla ROBUST a byl regulován frekvenčním měničem. Rozsah frekvenčního měniče FC 550 je od 24 do 60 [Hz]. Začal jsem s nejnižší hodnotou 24 [Hz], kterou jsem následně zvyšoval s frekvenčním skokem 4 [Hz]. První měřenou veličinou byl tlak. Tlak byl měřen v oblasti pod a nad roštem a na výstupu z kolony. Naměřené tlaky v oblasti nad roštem a na výstupu z kolony byly téměř totožné, proto jsem se zaměřil pouze na tlak pod roštem a na výstupu z kolony. Dále jsem ve vrchní části snímal maximální rychlost v_{max} [m.s⁻¹] pomocí snímače rychlosti proudění vzduchu.

6.2.1 Postup výpočtu

V prvním kroku jsem vypočetl velikost tlakové ztráty Δp_{FV} [Pa] proudícího vzduchu přes porézní prostředí. Tlaková ztráta se je rovna odečtením tlaků pod roštem a na výstupu z kolony.

Dále jsem maximální rychlost přepočítal na střední rychlost v_s [m.s⁻¹]. Tu jsem vypočítal dle následujících rovnic a vztahů [15].

Určení Reynoldsova čísla Re :

$$Re = \frac{v_{max} \cdot d}{\nu} [-] \quad (6.1)$$

Určení exponentu rychlostního profilu n_0 :

$$n_0 = \frac{1}{1 + \sqrt[6]{\frac{Re}{50}}} [-] \quad (6.2)$$

Určení poměru střední a maximální rychlosti m :

$$m = \frac{1}{1 + n_0} [-] \quad (6.3)$$

Určení střední rychlosti v_s :

$$v_s = m \cdot v_{\max} [m \cdot s^{-1}] \quad (6.4)$$

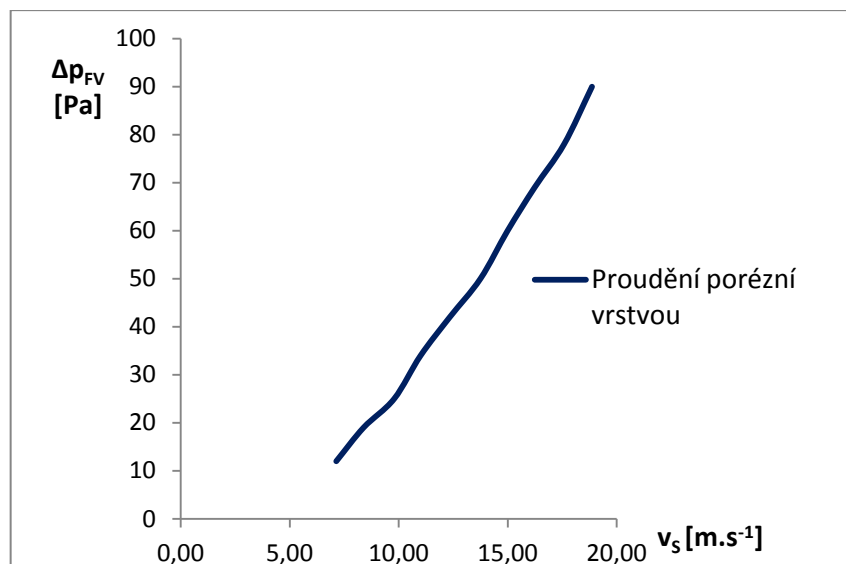
Výsledky měření a výpočtů jsou v tabulkách 5 a 6.

Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty	
f	p ₁	p ₂	v _{max}	Δp _{FV}	v _s
[Hz]	[Pa]	[Pa]	[m.s ⁻¹]	[Pa]	[m.s ⁻¹]
24	86	74	9	12	7,13
28	110	91	10,54	19	8,38
32	137	112	12,26	25	9,79
36	168	134	13,74	34	11,00
40	201	159	15,37	42	12,34
44	239	189	17,08	50	13,75
48	280	220	18,59	60	14,99
52	321	252	20,09	69	16,23
56	368	290	21,72	78	17,58
60	413	323	23,27	90	18,87

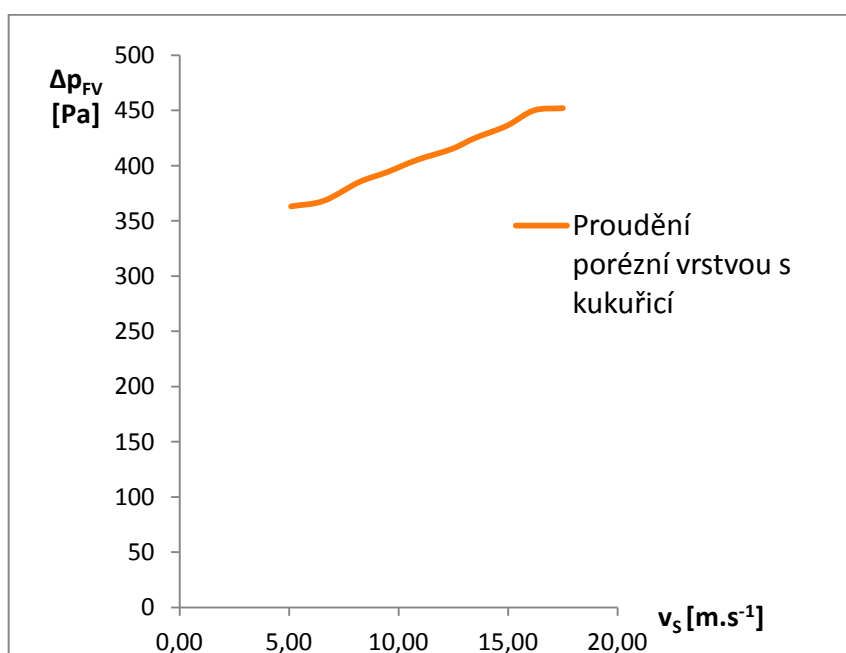
Tabulka 5: Naměřené a vypočtené hodnoty proudění porézní vrstvou

Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty	
f	p ₁	p ₂	v _{max}	Δp _{FV}	v _s
[Hz]	[Pa]	[Pa]	[m.s ⁻¹]	[Pa]	[m.s ⁻¹]
24	360	-3	6,48	363	5,09
28	380	12	8,32	368	6,58
32	415	30	10,31	385	8,19
36	445	51	11,87	394	9,47
40	480	75	13,53	405	10,83
44	517	102	15,47	415	12,42
48	555	130	16,77	425	13,49
52	597	161	18,52	436	14,93
56	643	193	20,03	450	16,18
60	682	230	21,62	452	17,50

Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty proudění porézní vrstvou s kukuřicí



Obrázek 26: Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti vzduchu při proudění přes porézní prostředí



Obrázek 27: Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti vzduchu při proudění přes porézní prostředí s vrstvou kukuřice

7. Ekonomické vyhodnocení projektu

Projekt „popkornového“ fluidního zařízení byl financován katedrou energetiky na Vysoké škole báňské – Technické univerzity Ostrava. Celkové náklady na pořízení všech komponent se vyšplhaly na částku přibližně 190 000 [Kč]. Skleněný cyklón dodaný firmou G. DIEHM Process Systems se ve finále ukázal jako investičně nejnákladnější komponenta. Podrobnější informace o cenách jednotlivých částí projektu jsou uvedeny v tabulce (tab. 7).

Ekonomické vyhodnocení projektu		
	Firma	Cena s DPH [Kč]
Konstrukce rámu		11 700
Hliníkové profily	Haberkorn	5 300
Kolečka	Haberkorn	1 500
Desky	Hornbach	300
Spojovací materiál	Haberkorn	4 600
Stlačení vzdušiny		38 100
Dmýchadla	Weldplast	28 900
Frekvenční měnič	Weldplast	9 200
Ohřev vzdušiny		31 500
Ohřívač vzduchu	Weldplast	21 600
Teplotní regulátor	Weldplast	8 200
Termosonda	Weldplast	1 700
Doprava vzdušiny		102 900
Hadice vzduchová	Weldplast	2 000
Adaptér	Weldplast	1 000
Nerezový konektor	Weldplast	1 500
Nerezové koleno	Armaturygroup	4 600
Nerezový T-kus	Armaturygroup	5 400
Skleněná kolona	Kavalier	1 500
Skleněný cyklón	Merci	86 900
Spojovací materiál		4 500
Celkem		188 700

Tabulka 7: Ekonomické vyhodnocení jednotlivých částí projektu

8. Závěr

Diplomová práce se zabývá výpočtem potřebných dat a parametrů pro následnou realizaci „popkornového“ fluidního zařízení. Tento model bude sloužit k demonstraci fluidního jevu při výrobě popkornu.

Teoretická část obsahuje popis fluidace, její fyzikální vlastnosti a také popis vzniku jednotlivých vrstev a jejich uplatnění v technické praxi. Jsou v ní uvedeny základní konstrukční typy fluidních kotlů. Dále rozebírá jednotlivé druhy paliv spalovaných ve fluidních ohništích včetně jejich vlivu na tvorbu emisí a životní prostředí. V závěru kapitoly jsou uvedeny výhody a nevýhody fluidního spalování.

Pomocí teoretických vztahů byl proveden výpočet tlakové ztráty, prahové rychlosti fluidace a prahové rychlosti úletu. Rozhodujícím faktorem pro výběr vhodného typu dmýchadla byla právě prahová rychlost úletu částic. Tato rychlost měla zaručit přemístění všech částic popkornu o maximální velikosti $d_p = 20$ [mm] ze skleněné kolony do cyklónu. Potřebná rychlost pro přemístění částic popkornu je $4,057$ [m.s⁻¹]. Tuto rychlost zajistí dvě dmýchadla ROBUST od firmy Leister, která jsou v paralelním zapojení.

Před samostatnou realizací projektu byla provedena simulace proudění vzduchu na zjednodušeném modelu v softwaru Ansys – Fluent. Zjednodušený model představovala kolona a do ní byla umístěna vrstva kukuřice. Místo zadaného neizotermního proudění částic byla soustava řešena izotermně. Výsledné průběhy simulací jsou ilustrovány v obrázcích. Vliv teploty na přeměnu kukuřice v popkorn nebyl díky své složitosti řešen.

V kapitole realizace projektu jsou rozebrané jednotlivé komponenty „popkornového“ fluidního zařízení a je uveden základní popis jejich instalace.

V další kapitole je popsán pokus na daném zařízení. Jsou zde popsány měřicí zařízení. Hlavní sledované veličiny byly tlak a rychlost proudícího média v oblasti roštu a na výstupu z kolony. Kolona byla rozdělena na 3 měřicí úseky, přičemž v každé části byl snímán tlakový spád.

V ekonomické části jsou v tabulce uvedeny náklady na pořízení jednotlivých komponent. Konečná cena všech dílů se vyšplhala na částku 190 000 [Kč]. Skoro polovinu této částky představuje cena za skleněný cyklón.

Hlavním cílem této diplomové práce byla realizace „popkornového“ fluidního zařízení. Tento cíl byl splněn. Na vzniklém modelu se v budoucnu mohou realizovat pokusy s různými velikostmi a hustotami částic. Dále je možnost lépe prozkoumat vliv částic popkornu na proudění v závislosti na teplotě v softwaru Ansys – Fluent.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí diplomové práce paní prof. RNDr. Miladě KOZUBKOVÉ, CSc. za cenné připomínky a odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Všem, kteří svou radou pomohli. Dovolte, abych v neposlední řadě poděkoval mým rodičům za to, že mi umožnili studium na této škole.

V Ostravě: 17. 5. 2013

.....

(Podpis autora)

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Literatura:

- [1] KUNII, Daizo a Octave LEVENSPIEL. *Fluidization engineering*. 2nd ed. Boston [u.a.]: Butterworths, 1990. ISBN 04-099-0233-0..
- [2] NOVOTNÝ, Pavel a Ludvík FIALA. *Spalování paliv a odpadů ve fluidní vrstvě*. Praha: SNTL, 1977.
- [3] BERÁNEK, Jaroslav a Drahomír SOKOL. *Fluidní technika*. Praha: SNTL, 1961.
- [4] VORÁČ, Petr. *Návrh a optimalizace fluidního roštu z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 67s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.
- [5] NEUŽIL, Lubomír a Vladimír MÍKA. *Chemické inženýrství I. a II.*, uprav.vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1998. s. 246-265. ISBN 80-708-0312-6.
- [6] MÍKA, Vladimír a Lubomír NEUŽIL. *Chemické inženýrství II. 2. přepr.vyd.* Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. 310 s. ISBN 80-708-0359-2.
- [7] ČECH, Bohumír. *Diagnostické metody měření spalinových traktů a jejich aplikace u kotlů s fluidní vrstvou*. 1998. Doktorská disertační práce.
- [8] ČECH, Bohumír. *Přehled fluidních kotlů v energetice České republiky*. Ostrava, 2010.
- [9] CEJPKOVÁ, Andrea. *Odsiřování fluidních kotlů*. Praha, 2009. Dostupné z: http://tresen.vscht.cz/kap/data/studentska_cinnost/obhajoba_semestrálního_projektu_2009/46_odsirovani_fluidnich_kotlu_soubor.pdf. Semestrální projekt.
- [10] PROKŠA, O. *Stanovení vlivu spalovacího a zplyňovacího režimu na tvorbu znečišťujících látek v kamnech na dřevo*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – TUO, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 44 s. Vedoucí práce: HORÁK, J.
- [11] KOZUBKOVÁ, Milada, BLEJCHAŘ, Tomáš a Marian BOJKO. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. 2011. ISBN 978-80-248-2491-8

- [12] JIROUT, Tomáš. *Průtok porézní vrstvou*. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.jirout/vyuka/hmz/hmz3.pdf>
- [13] KOZUBKOVÁ, Milada a KOLEKTIV. *Mechanika tekutin: návody pro laboratorní měření*. Ostrava, 2007. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/navod.pdf>
- [14] FLUENT: FLUENT 14. *User`s guide*. Fluent Inc. 2011
- [15] KOZUBKOVÁ, Milada a Sylva DRÁBKOVÁ. *Cvičení z mechaniky tekutin*. Ostrava, 2002. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/HydroPrikklad.pdf>

Internetové zdroje:

- [16] Weldplast ČR s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.weldplast.cz>
- [17] Aqua-Calc [online]. 2005-2013. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.aqua-calc.com/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Analogie vlastností fluidní vrstvy s reálnou kapalinou [1]	4
Obrázek 2: Typy fluidní vrstvy [1]	5
Obrázek 3: Geldartovo rozdělení částic [1]	10
Obrázek 4: Winklerův reaktor na zplyňování uhlí [1]	11
Obrázek 5: Schéma fluidního kotle typu IGNIFLUID [7]	13
Obrázek 6: Schéma fluidního kotle typu DUKLAFLUID [2]	14
Obrázek 7: Schéma cirkulujícího kotle K12 v ENERGETICE Třinec [7]	15
Obrázek 8: Geometrie základní oblasti s vytvořenou sítí	26
Obrázek 9: Graf rychlostního pole přes porézní prostředí	29
Obrázek 10: Průběh změny tlaku přes porézní prostředí	29
Obrázek 11: Graf rychlostního pole přes porézní prostředí s vrstvou kukuřice	30
Obrázek 12: Průběh změny tlaku přes porézní prostředí s vrstvou kukuřice	30
Obrázek 13: Objemové zastoupení částic kukuřice v proudícím médiu	31
Obrázek 14: Konstrukce rámu v programu Autodesk Inventor	32
Obrázek 15: Dmýchadlo ROBUST od firmy Leister [16]	33
Obrázek 16: Charakteristická křivka paralelního zapojení dmýchadel ROBUST [16]	33
Obrázek 17: Frekvenční měnič FC 550 od firmy Leister [16]	34
Obrázek 18: Ohřívač vzduchu LHS 61L SYSTEM od firmy Leister [16]	34
Obrázek 19: Teplotní regulátor CSS od firmy Leister [16]	35
Obrázek 20: 3D model skleněné kolony v programu Autodesk Inventor	35
Obrázek 21: 3D model nerezového kolena v programu Autodesk Inventor	36
Obrázek 22: 3D model nerezového t-kusu v programu Autodesk Inventor	36
Obrázek 23: 3D model nerezového roštu v programu Autodesk Inventor	37

Obrázek 24: Model cyklónu v programu Autodesk Inventor	38
Obrázek 25: Sestava „popkornového“ fluidního zařízení v programu Autodesk Inventor	39
Obrázek 26: Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti vzduchu při prodění přes porézní prostředí.....	43
Obrázek 27: Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti vzduchu při proudění přes porézní prostředí s vrstvou kukuřice	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vyhodnocení analytického výpočtu.....	24
Tabulka 2: Okrajové podmínky.....	28
Tabulka 3: Parametry tlakového snímače (DM) [13]	40
Tabulka 4: Parametry vyhodnocovacího zařízení ALMENO [13].....	40
Tabulka 5: Naměřené a vypočtené hodnoty proudění porézní vrstvou	42
Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty proudění porézní vrstvou s kukuřicí	42
Tabulka 7: Ekonomické vyhodnocení jednotlivých částí projektu	44

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Ar	Archimédovo kritérium	[-]
CaCO ₃	uhličitan vápenatý	[-]
C _D	součinitel odporu vzduchu	[-]
C ₂	koeficient změny tlaku	[m ⁻¹]
CO	oxid uhličitý	[-]
d	průměr trubky	[m]
d _p	charakteristický průměr částice	[m]
F _{Ar}	vztlaková síla	[N]
F _R	odporová síla	[N]
F _V	objemová síla	[N]
g	gravitační konstanta	[m.s ⁻²]
h	výška trubky	[m]
m	poměr střední a maximální rychlosti	[-]
m _s	hmotnost částic	[kg]
n ₀	exponent rychlostního profilu	[-]
NO _x	oxidy dusíku	[-]
NO	oxid dusnatý	[-]
NO ₂	oxid dusičitý	[-]
n _{ROŠT}	pórovitost roštu	[-]
Δp	tlaková ztráta	[-]
Δp _{FV}	tlaková ztráta porézního prostředí	[-]
PM _{2,5}	jemná prachová částice	[m]
PM ₁₀	hrubá prachová částice	[m]

Re	Reynoldsovo kritérium	[-]
Re _{p,mf}	Reynoldsovo kritérium pro fluidaci	[-]
Re _p	Reynoldsovo kritérium pro částice	[-]
S	průřez	[m]
SO _x	oxidy síry	[-]
SO ₂	oxid siřičitý	[-]
SO ₃	oxid sírový	[-]
TZL	tuhé znečišťující látky	[-]
u _{mf}	prahová rychlost fluidace	[m.s ⁻¹]
V _B	celkový objem fluidní vrstvy	[m ³]
V _{CELIK}	celkový objem roštu	[m ³]
V _{DĚR}	objem děr	[m ³]
V _F	objem volného prostoru	[m ³]
V _S	objem částic	[m ³]
V _{SB}	objem vrstvy částic	[m ³]
v _{max}	maximální rychlost	[m.s ⁻¹]
v _s	střední rychlost	[m.s ⁻¹]
v _t	prahová rychlost úletu	[m.s ⁻¹]
V _{DĚR}	objem děr roštu	[m ³]
V _{CELIK}	celkový objem roštu	[m ³]
w	rychlost proudící tekutiny	[m.s ⁻¹]
α	součinitel přebytku vzduchu	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
α	propustnost	[m ²]
ε	mezerovitost	[-]

μ	dynamická viskozita	[Pa.s]
ν	kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ρ_f	hustota proudícího vzduchu	[kg.m ⁻³]
ρ_s	hustota částic	[kg.m ⁻³]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Sestava cyklónu

Příloha B: Cyklón

Příloha C: Připojovací trubka